

**Wechselwirkungsanalyse zwischen dem
Physikalischen Optimum, dem Betriebswirtschaftlichen
Optimum und dem Carbon-Footprint-Optimum
(PhO-BwO-CFO)**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Nicolei Beckmann
aus Kaltenkirchen

genehmigt von der Fakultät für
Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung

01.12.2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. habil. B. Lehmann
Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr. rer. nat. habil. H.-J. Gursky
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. O. Carlowitz
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. B. Sankol

D 104

© **PAPIERFLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2018
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld
www.papierflieger.eu

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

ISBN 978-3-86948-616-1

Danksagung

Bedanken möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Otto Carlowitz und dem Team des Instituts für Umweltwissenschaften für die großartige Unterstützung während der Promotionszeit. Unsere Diskussionen haben immer neue Betrachtungsansätze und alternative Blickwinkel eröffnet. Bei allen großen und kleinen Fragen erhielt ich stets eine schnelle, freundliche Antwort. Vielen lieben Dank.

Einen besonderen Dank möchte ich an Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Sankol aussprechen. Bereits während des Grundstudiums haben die Vorlesungen von Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Sankol an der HAW-Hamburg mein Interesse an Energieeffizienzanalysen geweckt. Die anschließende Förderung und Forderung hat den Weg zur Promotion geebnet. Vielen Dank dafür und ich hoffe, dass wir auch in Jahren immer noch über diese Thematik diskutieren.

Weiterer Dank geht an Sven Krämer, Maik Ohlrogge und Herrn Heinisch für die hilfreichen Gespräche und Hinweise zu dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die während des gesamten Studiums immer hinter mir stand und mich unterstützt hat. Insbesondere meine Lebenspartnerin und unsere Tochter haben mir immer den Rücken freigehalten. Sie haben die vielen Wochenenden akzeptiert, die ich nicht ansprechbar an meinem Schreibtisch verbrachte. Haben mir ein Stück Schokolade an den Schreibtisch gebracht, wenn ich mal nicht weitergekommen bin. Dafür vielen lieben Dank.

Allen zusammen möchte ich nochmal meinen herzlichen Dank aussprechen!

KURZFASSUNG

Die Dissertation „*Wechselwirkungsanalyse zwischen dem Physikalischen Optimum, dem Betriebswirtschaftlichen Optimum und dem Carbon Footprint Optimum (PhO-BwO-CFO)*“ untersucht technische Systemkonzeptionen unter ökonomischen und ökologischen Aspekten. Dabei werden die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Betrachtungen über alle Lebenszyklusphasen einer Systemkonfiguration analysiert.

Als ökologische Einflussfaktoren werden die Effizienz während der Betriebsphase und die äquivalenten Treibhausgasemissionen in die Bewertung einbezogen. Um die Analyse optimal anpassen zu können, lassen sich die Treibhausgasemissionen durch andere Umweltaufwendungen äquivalent ersetzen (z. B. durch das Versauerungspotenzial).

Die Effizienz während der Betriebsphase wird über das Verfahren des Physikalischen Optimums (PhO) auf unüberwindbare physikalische Grenzen bezogen. Dadurch entsteht eine Bilanzierung auf ein tatsächlich vorhandenes Optimierungspotenzial.

Aus den Erkenntnissen der Wechselwirkungsanalysen werden Gleichungen abgeleitet, die eine Systemkonfiguration in einem gemeinsamen Optimum ermöglichen. Diese Schnittmenge als Kompromiss zwischen dem ökonomischen und ökologischen Optimum wird über eine Systemvariable (SV) bestimmt, die Einfluss auf beide Aspekte aufweist.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren der *Technologieanalyse* werden unterschiedliche Konfigurationen bezüglich ihrer Effektivität unter ökonomischen und ökologischen Aspekten analysiert und kombiniert bewertet.

Ergänzt werden die Wechselwirkungsanalysen durch eine Betrachtung bereits existierender Systeme. Mit Untersuchungen des Wartungszeitpunktes lassen sich die Betriebsparameter in einem effizienten Bereich halten, in dem ein ökonomischer/ökologischer Vorteil während der Betriebsphase generiert wird.

Optimale Reinvestitionen unter ökonomischen und ökologischen Aspekten werden über eine Indifferenz der Konfigurationen hergeleitet. Somit lassen sich Grenzwerte klar definieren, ab denen ökonomische bzw. ökologische Vorteile erzielt werden können.

Eine abschließende Obsoleszenzanalyse bekräftigt die Notwendigkeit von Lebenszyklusanalysen für Investitionsgüter.

Zu allen Verfahren werden ausführliche Beispielberechnungen vorgestellt. Sie verdeutlichen die Handhabung aller in dieser Arbeit entwickelten Gleichungen.

ABSTRACT

The dissertation "*Interaction Analysis PhO-BwO-CFO*" examines system concepts under economic and ecological aspects. It analyses interactions of the different considerations over the entire lifecycle phases of a system configuration.

The efficiency during the operating phase and the equivalent greenhouse gas emissions are considered as ecological influencing factors. At the same time, the greenhouse gas emissions should be replaceable with other environmental expenditures on an equivalent level for a high individuality of the analysis (e.g. the acidification potential).

The efficiency during the operating phase is related to insurmountable physical limits by the method of the physical optimum (PhO). This serves to demonstrate a realistic optimization potential.

From the findings of the interaction analysis, equations are derived which allow a system configuration in a common optimum. This compromising intersection between the economic (BwO) and ecological optimum is determined by a system variable (SV), which influences both aspects.

The process of technology analysis analyses and evaluates different configurations with regard to their effectiveness under economic and ecological aspects. Investigations of the optimal maintenance point of time help to keep the operating parameters in ecologically efficient limits and thus to generate an economic advantage during the operating phase.

Optimal reinvestment of existing systems under economic and ecological aspects are derived by an indifference of the configurations. Limits can thus be defined for a benefit. Various life expectancies of goods are finally examined in respect of obsolescence. For all methods extensive sample calculations are presented. Thus the developed methods can be illustrated.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	v
Abstract	vi
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Gleichungsverzeichnis	xiv
Tabellenverzeichnis	xviii
Indizes, Formelzeichen	xx
1 Einleitung	1
2 Problemstellung	2
2.1 Ökonomische Betrachtung	2
2.2 Ökologische Betrachtung	3
2.2.1 Der Treibhauseffekt	5
2.2.2 Pariser Klimaschutz-Übereinkommen	6
2.3 Konflikt der Betrachtungen	8
3 Ökonomische Bewertungsverfahren	10
3.1 Eigenschaften der Betriebswirtschaft	10
3.2 Einbezogene Bestandteile der Betriebswirtschaft	11
3.3 Investitionskostenrechnung	13
3.3.1 Kostenvergleichsrechnung (KVR)	14
3.3.2 Gewinnvergleichsrechnung (GVR)	15
3.3.3 Rentabilitätsvergleichsrechnung (RVR)	16
3.3.4 Amortisationsvergleichsrechnung (AVR)	16
3.3.5 Kapitalwertmethode (KWM)	17
3.3.6 Amortisationsmethode	17
3.3.7 Interner Zinsfuß	18
4 Lebenszykluskosten	19
5 Ökologische Bewertungsverfahren	21
5.1 Nachhaltigkeit	21
5.2 Nachhaltigkeitscontrolling	24
5.3 Betriebliches Umweltmanagement (UMS)	25
5.4 Ressourceneffizienz	26
5.5 Energetische Ressourceneffizienz	27
5.6 Ökobilanz/LCA (Life Cycle Assessment)	29

5.7	Ökologieorientierte Bewertungssysteme	29
6	Wechselwirkungen von Ökonomie und Ökologie	32
7	Das Physikalische Optimum (PhO)	34
7.1	Definition und Beispiele	34
7.2	Optimale Anlagengestaltung nach dem PhO.....	38
8	Das Betriebswirtschaftliche Optimum (BwO)	40
8.1	Analyse über die Kapitalwertmethode	40
8.2	Einfluss von Teuerung und Verzinsung	42
8.3	Betriebswirtschaftliche Bewertung (BwO).....	43
8.4	Optimale Anlagengestaltung nach dem BwO.....	46
9	Das Carbon-Footprint-Optimum (CFO).....	49
10	Wechselwirkungsanalyse PhO, BwO und CFO	51
10.1	Das Verfahren der Wechselwirkungsanalyse	51
10.1	Anlagenfaktor als Wechselwirkungsbeschreibung	51
10.2	Anlagenfaktor PhO-BwO	52
10.3	Grenzen des Anlagenfaktors.....	53
10.4	Mathematischer Zusammenhang PhO-BwO	54
10.5	Anlagendimensionierung PhO-BwO-CFO	58
10.5.1	Lineare Kompromissfindung.....	58
10.5.2	Spezielle Kompromissfindung	59
10.6	Ergebnis Wechselwirkungsanalyse	61
11	Anwendung der Wechselwirkung zwischen PhO, BwO und CFO	63
11.1	Theoretische Grundlagen.....	63
11.1.1	Anlagendimensionierung nach dem PhO.....	64
11.1.2	Anlagendimensionierung nach dem BwO.....	67
11.2	Anlagenberechnung über den Anlagenfaktor.....	69
11.3	Anlagendimensionierung nach dem CFO	70
11.4	Kompromisspunkt PhO-BwO-CFO	72
12	Technologieanalyse	74
12.1	Das Verfahren der Technologieanalyse.....	74
12.2	Ergebnis der Technologieanalyse.....	77
13	Beispiel einer Technologieanalyse.....	78
14	Optimaler Wartungszeitpunkt	87
14.1	Optimaler Wartungszeitpunkt nach dem BwO	87

14.2	Optimaler Wartungszeitpunkt nach dem CFO	90
14.3	Optimaler Wartungszeitpunkt nach dem PhO	90
14.4	Ergebnis der Wartungszeitpunktanalyse	91
15	Ersatzproblem	92
15.1	Beurteilung der Kapitalwertmethode	92
15.2	Ökologische Betrachtung eines Ersatzproblems	93
15.3	Weiterentwicklung der Potenzialanalyse	94
15.4	Ergebnis Ersatzproblem	95
16	Obsoleszenzanalyse	97
16.1	Bedeutung und Gründe der Obsoleszenz	97
16.2	Bewertung der Obsoleszenz mit dem PhO	100
16.3	Ökonomische Bewertung der Obsoleszenz	100
16.4	Physikalischer Differenzleistungsfaktor	101
16.5	Bewertung der Obsoleszenz über den Carbon Footprint	103
16.6	Wechselwirkung PhO-CFO	103
16.7	Ergebnis Obsoleszenzanalyse	104
17	Fazit	105
18	Literatur	107
19	Anhang	I
I	Lebenslauf	II
II	Wissenschaftliche Veröffentlichungen	IV
III	Analyse Wechselwirkung	V
a.	Wärmewürfelsimulation Matlab PhO, BwO und CFO	V
b.	Herleitung PhO	XIV
c.	Herleitung BwO	XV
d.	Herleitung CFO	XVI
e.	Herleitung Wechselwirkung PhO und BwO	XVII
f.	Wechselwirkung mit falschem Anlagenfaktor	XVIII
g.	Zusatzbeispiel Rohrleitungsdimensionierung	XX
h.	Rohrleitungsdimensionierung nach dem PhO	XXII
i.	Rohrleitungsdimensionierung nach dem BwO	XXIII
j.	Rohrleitungsdimensionierung nach dem CFO	XXVI
k.	Kompromisspunkt Rohrleitung	XXVII
l.	Ergebnisse aller Rohrleitungsquerschnitte	XXVIII

IV	Analyse Wartungszeitpunkt	XXX
a.	Beispiel Wartungszeitpunkt.....	XXX
b.	Analyse des optimalen Wartungszeitpunktes nach dem BwO	XXXII
c.	Analyse des optimalen Wartungszeitpunktes nach dem CFO	XXXV
d.	Analyse des optimalen Wartungszeitpunktes nach dem PhO	XXXVI
V	Analyse Ersatzproblem.....	XXXVIII
a.	Kostenvergleichsrechnung Ersatzproblem.....	XXXVIII
b.	Gewinnvergleichsrechnung Ersatzproblem	XL
c.	Ergebnis Ersatzproblem	XLI
d.	Beispiel Beleuchtungsanlage Ersatzproblem.....	XLII
e.	Ökonomische Bewertung zum Ersatzproblem	XLIII
f.	Ökologische Bewertung zum Ersatzproblem.....	XLVII
VI	Obsoleszenzanalysen	XLIX
a.	Beispiel Obsoleszenzanalyse.....	XLIX
b.	Ökonomischer Vergleich	L
c.	Ökologischer Vergleich.....	LII
d.	Ökonomischer Vergleich mit zwei Variablen	LIII
e.	Ökonomisches Ergebnis	LV
f.	Herleitung Obsoleszenz eine Variable	LVIII
g.	Herleitung Obsoleszenz zwei Variablen.....	LIX
h.	Ökologisches Ergebnis.....	LXI

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Aufbau des ökonomischen Gesamtwertes [5]	4
Abbildung 2-2:	Energiebedarf der Welt in Millionen Tonnen Öleinheiten [2]	7
Abbildung 2-3:	Schnittmenge Ökonomie und Ökologie	9
Abbildung 3-1:	Zusammenhang zwischen Effizienz und Kosten [1]	12
Abbildung 3-2:	Investitionsrechnungsverfahren	13
Abbildung 4-1:	Lebenszykluskosten LCC [15]	19
Abbildung 4-2:	LCC im Beschaffungsprozess [15]	20
Abbildung 5-1:	Das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit	21
Abbildung 5-2:	Strategien der Nachhaltigkeit	23
Abbildung 5-3:	Zusammenhang der Managementsysteme	25
Abbildung 5-4:	Natürliche Ressourcen. Eigene Darstellung nach [19]	26
Abbildung 5-5:	Modell Energiemanagementsystem [23]	28
Abbildung 6-1:	Bewertung der Produktlebensphasen	32
Abbildung 7-1:	Kopplungsprozessbewertung PhO [1]	35
Abbildung 7-2:	Handlungsmotivation [1]	36
Abbildung 7-3:	Verbrauchs- und Bedarfsperspektive [27]	37
Abbildung 7-4:	Bilanzsystem Photovoltaikmodul	37
Abbildung 7-5:	Bilanzsystem für eine Lichtquelle	38
Abbildung 8-1:	Kapitalwertanalyse verschiedener Anlagenkonfigurationen	41
Abbildung 8-2:	Vergleich PhO-System mit der Kapitalwertmethode	41
Abbildung 8-3:	Resultierender BwO-Faktor über die Betriebslaufzeit	42
Abbildung 8-4:	Kapitalwertanalyse unterschiedlicher Konfigurationen	43
Abbildung 8-5:	BwO-Faktor unterschiedlicher Konfigurationen	43
Abbildung 8-6:	Bestandteile der Operationskosten	45
Abbildung 8-7:	Vergleich Faktorenverläufe für das PhO und das BwO	46
Abbildung 8-8:	Verlauf der Teuerung in Abhängigkeit von der Laufzeit	46
Abbildung 8-9:	Verlauf des Barwerts in Abhängigkeit von der Laufzeit	47
Abbildung 9-1:	CO ₂ -Emissionsfaktor Strommix, 2015 Hochrechnung [30], 2016 eigene Hochrechnung	50
Abbildung 10-1:	Ablauf Anlagendimensionierung PhO, BwO und CFO	51
Abbildung 10-2:	Anlagenfaktor zur Wechselwirkung von PhO und BwO	52
Abbildung 10-3:	Verlauf des Anlagenfaktors	53
Abbildung 10-4:	Verlauf Anlagenfaktor Zusatzbedingung	54

Abbildung 10-5:	Verlauf linearer Investitionskosten	56
Abbildung 10-6:	Betriebskosten linear/quadratisch	57
Abbildung 10-7:	Gewichtungsvariation PhO, BwO und CFO	59
Abbildung 10-8:	Konzeptionsablauf Wechselwirkungsanalyse	60
Abbildung 10-9:	Anlagengestaltung im Schnittpunkt von Betriebswirtschaftlichem, Physikalischem und Carbon-Footprint-Optimum	61
Abbildung 10-10:	Ablauf Wechselwirkungsanalyse und Anlagengenkonfiguration	62
Abbildung 11-1:	Bilanzsystem Wärmewürfel (WW)	63
Abbildung 11-2:	Verlustleistung in Abhängigkeit von der Isolierstärke	66
Abbildung 11-3:	Anlagenkonfigurationen in Variation der Gewichtungen	73
Abbildung 12-1:	Ablauf der Technologieanalyse	74
Abbildung 12-2:	Auswertung einer Technologieanalyse	76
Abbildung 13-1:	Energiebedarf in Abhängigkeit von der Isolierstärke [32]	79
Abbildung 13-2:	Bilanzgrenze Isolierung	80
Abbildung 13-3:	Ergebnis lineare Isoliermaterialbewertung Technologieanalyse	84
Abbildung 13-4:	Vergleich Isoliermaterialien mit gewichteter Bewertung	86
Abbildung 14-1:	Ökonomische Wartungszeitpunktanalyse, kumulierter Kostenverlauf (2500 h)	89
Abbildung 14-2:	Ökonomische Wartungszeitpunktanalyse, kumulierter Kostenverlauf (4500 h)	89
Abbildung 14-3:	Wartungszeitpunkt-Monitoring	91
Abbildung 16-1:	Ökonomische Obsoleszenz	102
Abbildung 16-2:	Grenzwerte Optima	102
Abbildung 16-3:	CF-Analyse Waschmaschine	104
Abbildung 17-1:	Optimaler Kompromisspunkt zwischen dem PhO, BwO und CFO	105
Abbildung 19-1:	Bilanzsystem von einem Wärmewürfel	V
Abbildung 19-2:	Schema Simulationsprogramm Matlab Teil 1	VII
Abbildung 19-3:	Schema Simulationsprogramm Matlab Teil 2	VII
Abbildung 19-4:	Schema Simulationsprogramm Matlab Teil 3	VIII
Abbildung 19-5:	Auswertung Optima der Matlabsimulation	IX
Abbildung 19-6:	Einfluss der Isolierungsstärke auf die Anlagenparameter	X
Abbildung 19-7:	Optimale Isolierungsstärke in Abhängigkeit der Betriebslaufzeit	XIII
Abbildung 19-8:	Bilanzgrenze Rohrleitung	XXI
Abbildung 19-9:	Zeta-Wert Rohrleitung in Abhängigkeit vom Durchmesser	XXIV

Abbildung 19-10: Geschwindigkeit, Gewicht und Kosten von Rohrleitungen in Abhängigkeit vom Durchmesser	XXIV
Abbildung 19-11: Kumulierter Kostenverlauf	XXXIV
Abbildung 19-12: Kostenverlauf über 4500 h	XXXV
Abbildung 19-13: Notwendige Anlageneffizienz und Restlaufzeit	XL
Abbildung 19-14: Bilanzsystem einer Beleuchtungsanlage	XLIII
Abbildung 19-15: LCC-Analyse Neu- und Bestandsanlage	XLIV
Abbildung 19-16: Notwendige Anlageneffizienz beim Ersatzproblem	XLVII
Abbildung 19-17: LCC-Analyse kurzlebige und langlebige Produkte	LI
Abbildung 19-18: LCC mit Effizienzsteigerung vom KLP	LII
Abbildung 19-19: Treibhausgasemissionen vom KLP und LLP	LIII
Abbildung 19-20: Grenzwerte Optima KLP-LLP	LV
Abbildung 19-21: Grenzwerte zwischen zwei Optima	LVIII
Abbildung 19-22: CF vom KLP, LLP und PhO	LXII

GLEICHUNGSVERZEICHNIS

(3-1)	Gesamtkosten nach [1]	11
(3-2)	Betriebswirtschaftliches Optimum nach [1]	12
(3-3)	Kostenmaximum nach [1]	12
(3-4)	Endwert Kapitalanlage	13
(3-5)	Aufzinsungsfaktor	14
(3-6)	Endwert Kapitalanlage mit Aufzinsungsfaktor	14
(3-7)	Endwert Kapitalanlage mit variablen Zinssätzen	14
(3-8)	Anfangswert Kapitalanlage	14
(3-9)	Abzinsungsfaktor	14
(3-10)	Kostenvergleichsrechnung (KVR)	14
(3-11)	Lineare Abschreibung	15
(3-12)	Kalkulatorische Zinsen	15
(3-13)	Gewinn	16
(3-14)	Gewinnvergleichsrechnung (GVR)	16
(3-15)	Rentabilitätsvergleichsrechnung (RVR)	16
(3-16)	Statische Amortisationsvergleichsrechnung (AVR)	17
(3-17)	Kapitalwertmethode (KVR)	17
(3-18)	Kapitalwert als Summenfunktion	17
(3-19)	Interner Zinsfuß	18
(5-1)	Kumulierter Energieaufwand (KEA) nach [2]	30
(5-2)	Angepasster kumulierter Energieaufwand	30
(5-3)	Carbon Footprint (CF)	31
(7-1)	Physikalische Wirkarbeit	34
(7-2)	Systemarbeit	34
(7-3)	PhO-Faktor nach [1]	35
(7-4)	PhO-Leistungsfaktor nach [1]	35
(7-5)	Physikalische Wirkarbeit Kopplungsprozesse nach [1]	35
(7-6)	Physikalische Wirkarbeit Prozesswirkungsgrad nach [1]	36
(7-7)	Potenzialanalyse nach [1]	36
(7-8)	PhO-Faktor Verbrauchsprozess nach [3]	37
(7-9)	PhO-Faktor Bedarfsprozess nach [3]	37
(7-10)	Physikalischer Differenzfaktor (ΔF_{pho})	39
(7-11)	Physikalischer Leistungsdifferenzfaktor (Δf_{pho})	39

(8-1)	Maximaler Kapitalwert	40
(8-2)	BwO-Faktor Kapitalwert	41
(8-3)	Kostenanalyse Kapitalwert (CoC)	44
(8-4)	Jährliche Betriebskosten (a_t)	44
(8-5)	Jährliche Betriebskosten in Abhängigkeit von den Operationskosten	45
(8-6)	Jährliche Operationskosten (K_{OK})	45
(8-7)	BwO-Faktor Kostenanalyse Kapitalwert (F_{BwO})	45
(8-8)	Teuerungsfaktor (TZ_{Faktor})	46
(8-9)	Zinsfaktor/Barwertfaktor (Z_{Faktor})	47
(8-10)	Kostenanalyse Kapitalwert (CoC) inkl. dyn. Faktoren	47
(9-1)	Carbon-Footprint-Optimum (CFO)	49
(9-2)	CFO-Faktor (F_{CFO})	49
(9-3)	Carbon Footprint (CF)	49
(10-1)	Anlagenfaktor ($F_{AN_{BwO-PhO}}$)	52
(10-2)	Anlagenfaktor im Gleichgewicht	53
(10-3)	Kontrollgleichung 1, Anlagenfaktor	53
(10-4)	Kontrollgleichung 2, Anlagenfaktor	53
(10-5)	Anlagenfaktor Mittelwert ($F_{AN_{BwO-PhO\ m}}$)	54
(10-6)	Lineare Investitionskosten	55
(10-7)	Lineare Investitionskosten inkl. Grundkosten	55
(10-8)	Nichtlineare Investitionskosten	56
(10-9)	Nichtlineare Investitionskosten inkl. Grundkosten	56
(10-10)	Vereinfachung der Operationskosten	56
(10-11)	Spezifische Operationskosten (k_{OK})	56
(10-12)	Linearer Verbrauch	57
(10-13)	Steigungskoeffizient linearer Verbrauch	57
(10-14)	Nichtlinearer Verbrauch	57
(10-15)	Systemvariable ($SV_{BwO-PhO-CFO}$)	60
(10-16)	Gewichtung Anlagenfaktor (g)	60
(10-17)	Systemvariable gewichtet ($SV_{BwO-PhO-CFO\ g}$)	61
(11-1)	Wärmestrom Fluid	63
(11-2)	Wärmeverlustleistung	63
(11-3)	PhO-Leistungsfaktor elektrische Heizung	63

(11-4)	Wärmeübergangswiderstand gesamt	64
(11-5)	Wärmeübergangswiderstand Isolierung	64
(11-6)	Horizontale Fläche Wärmewürfel	64
(11-7)	Vertikale Fläche Wärmewürfel	64
(11-8)	Wärmestrom Heizung	64
(11-9)	Elektrische Heizenergie	64
(11-10)	Investitionskosten Isolierung	64
(11-11)	Vereinfachung Wärmeübergangswiderstand	65
(11-12)	Wärmeleitung, vereinfacht	65
(11-13)	Mittlere Isolierfläche	65
(11-14)	Systemleistung WW, vereinfacht	65
(12-1)	Kostenanalyse Kapitalwert Technologieanalyse (CoC_{Tech})	75
(12-2)	BwO-Faktor Technologieanalyse ($F_{BwO_{Tech}}$)	75
(12-3)	Carbon-Footprint-Technologieanalyse (CF_{Tech})	75
(12-4)	KEA-Technologieanalyse (KEA_{Tech})	75
(12-5)	CF-Faktor Technologieanalyse ($F_{CFO_{Tech}}$)	75
(12-6)	KEA-Faktor Technologieanalyse ($F_{KEA_{Tech}}$)	76
(12-7)	Anlagenfaktor Technologieanalyse ($F_{AN_{Tech}}$)	76
(12-8)	Anlagenfaktor Technologieanalyse gewichtet ($F_{AN_{Tech\ g}}$)	77
(14-1)	Gesamte Wartungskosten inkl. Ausfallkosten ($K_{W_{ges}}$)	88
(14-2)	Bedingung Wartungskosten	88
(14-3)	Wartungskosten in Anhängigkeit von der Zeit	89
(14-4)	Zeitdifferenz zwischen den Wartungen BwO (Δt_{BwO_W})	89
(14-5)	CF-Wartungsaufwand (CF_W)	90
(14-6)	Zeitdifferenz zwischen den Wartungen (Δt_{CFO_W})	90
(14-7)	PhO-Leistungsfaktor Wartungsbedarf (f_{PhO_W})	91
(14-8)	PhO-Faktor Wartungsbedarf inkl. Vorbereitung ($F_{PhO_W\ wvz}$)	91
(15-1)	Kostenvergleich Neu- und Bestandsanlage (KWM)	92
(15-2)	Mindestbetriebslaufzeit KWM ($n_{KWM_{min}}$)	93
(15-3)	PhO-Differenzleistungsfaktor KWM ($\Delta f_{PhO\ KWM_{min}}$)	93
(15-4)	Mindestbetriebslaufzeit CoC ($n_{BwO_{min}}$)	93
(15-5)	PhO-Differenzleistungsfaktor BwO ($\Delta f_{PhO_{BwO_{min}}}$)	93
(15-6)	Mindestbetriebslaufzeit CFO ($n_{CFO_{min}}$)	94

(15-7)	PhO-Differenzleistungsfaktor CFO ($\Delta f_{PhO_{CFO}}$)	94
(15-8)	Erweiterte Potenzialanalyse ($Potenzial_N$)	95
(16-1)	Reinvestitionshäufigkeit	100
(16-2)	Kapitalwertanalyse Obsoleszenz (CoC_{obs})	100
(16-3)	Differenz Kostenanalyse Kapitalwert Obsoleszenz (ΔCoC_{obs})	100
(16-4)	PhO-Differenzleistungsfaktor Obsoleszenz ($\Delta f_{PhO_{obs}}$)	101
(16-5)	Verbrauch inkl. Effizienzsteigerungen ($V_{KLP\ eff}^B$)	101
(16-6)	PhO-Differenzleistungsfaktor 2 Variablen	102
(16-7)	CF Emissionen inkl. Reinvestitionen	103
(16-8)	Differenzfaktor CF (ΔCF_{obs})	103
(16-9)	PhO-Differenzleistungsfaktor CF ($\Delta f_{PhO_{obs\ CF}}$)	103
(19-1)	Leistungsbedarf Fluidpumpe	XX
(19-2)	Hydraulische Leistung	XX
(19-3)	Dissipationswärme	XX
(19-4)	Druckverlust Strömung	XXX
(19-5)	Faktor Strömungsproblem	XXX
(19-6)	Relative Rauigkeit	XXX
(19-7)	Reynolds-Zahl	XXXI
(19-8)	Strömungsleistung	XXXII
(19-9)	Volumenstrom Rohr	XXXII
(19-10)	Strömungsarbeit PhO	XXXIII
(19-11)	Punkt der ökonomischen Indifferenz zwischen der Bestands- und Neuanlage (KVR)	XXXVIII
(19-12)	Mindestrestbetriebszeit Stückkosten (KVR)	XXXVIII
(19-13)	Mindestbetriebslaufzeit (KVR)	XXXIX
(19-14)	PhO-Differenzfaktor Ersatzproblem (KVR)	XXXIX
(19-15)	PhO-Differenzleistungsfaktor Ersatzproblem (KVR)	XXXIX
(19-16)	Variable Kosten, in den Energiekosten eingebunden	XXXIX
(19-17)	Mindestrestbetriebszeit (GVR)	XLI
(19-18)	PhO-Differenzfaktor Ersatzproblem (GVR)	XLI
(19-19)	Lichtstrom	XLV
(19-20)	Raumwinkel	XLV
(19-21)	Kostendifferenz Obsoleszenzanalyse	LI

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 13-1:	Daten für die Technologieanalyse	80
Tabelle 13-2:	Kostenübersicht Isolierstoffe	81
Tabelle 13-3:	Ökologische Bewertung Isolierung	82
Tabelle 13-4:	Lineare Auswertung	84
Tabelle 13-5:	Gewichtungsfaktoren	85
Tabelle 13-6:	Ergebnis gewichtet	85
Tabelle 19-1:	Wertebelegung Wärmewürfelsimulation	VI
Tabelle 19-2:	TZ-Faktoren, basierend auf einer TR von 3%	IX
Tabelle 19-3:	Ergebnisse Simulation 5 Jahre, Teil 1	XI
Tabelle 19-4:	Ergebnisse Simulation 5 Jahre, Teil 2	XI
Tabelle 19-5:	Ergebnisse Simulation 10 Jahre, Teil 1	XI
Tabelle 19-6:	Ergebnisse Simulation 10 Jahre, Teil 2	XI
Tabelle 19-7:	Ergebnisse Simulation 20 Jahre, Teil 1	XII
Tabelle 19-8:	Ergebnisse Simulation 20 Jahre, Teil 2	XII
Tabelle 19-9:	Ergebnisvergleich	XII
Tabelle 19-10:	Monotonietabelle BwO-Analyse	XVI
Tabelle 19-11:	Monotonietabelle CFO-Analyse	XVII
Tabelle 19-12:	Ergebnisse Anlagenfaktorfehler	XX
Tabelle 19-13:	Randparameter Wechselwirkung Rohrleitung	XXI
Tabelle 19-14:	Strömungsparameter Rohrleitungen	XXII
Tabelle 19-15:	Betriebskosten	XXIX
Tabelle 19-16:	Faktoren und CF-Aufwendungen	XXIX
Tabelle 19-17:	Randwerte Wartungsanalyse	XXXI
Tabelle 19-18:	Randwerte Ersatzproblem	XLIII
Tabelle 19-19:	Grunddaten Obsoleszenzanalyse	LV
Tabelle 19-20:	Daten LLP-Obsoleszenz	LVI
Tabelle 19-21:	Daten PhO-Obsoleszenz	LVI
Tabelle 19-22:	Daten KLP-Obsoleszenz	LVI
Tabelle 19-23:	Anlagenbewertung KLP-LLP	LVII
Tabelle 19-24:	Ergebnis Differenzfaktor Wasserverbrauch	LVIII
Tabelle 19-25:	Ergebnis Differenzfaktor elektrischer Energiebedarf	LVIII
Tabelle 19-26:	Grunddaten CO ₂ -Emissionen	LXI
Tabelle 19-27:	Emissionsgrundlagen LLP	LXI

Tabelle 19-28: Emissionsgrundlage KLP

LXI

Tabelle 19-29: Ergebnisse Obsoleszenzanalyse

LXII

INDIZES, FORMELZEICHEN

Indizes

ab	abgeführt
AN	Anlagen
äq	äquivalent
aus	Austritt
AV	Anlagevermögen
AVR	Amortisationsvergleichsrechnung
Betr	Betrieb
BSK	Betriebsstoffkosten
BW	Barwert
BwO	Betriebswirtschaftliches Optimum (lokal)
CF	Carbon Footprint
<i>cf</i>	spezifischer Carbon Footprint
CFO	Optimaler Carbon Footprint (lokal)
diff	diffus
DIN	Deutsches Institut für Normungen
dir	direkt
Distr	Distribution
Diss	Dissipation
e	vereinfacht
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ein	Eintritt
EKP	Externer Kopplungsprozess
el	elektrisch
EMAS	Eco Management and Audit Scheme
EN	Europäische Norm
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnMS	Energiemanagementsystem
EoL	End of Life
gem	gemäß
GI	Grundinvestition
GVR	Gewinnvergleichsrechnung
h	Stunde
heiz	Heizung
Herst	Herstellung
hor	horizontal
hyd	hydraulisch
IKP	Interner Kopplungsprozess

int	intern
ISO	International Organisation for Standardization
Iso	Isolierung
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KLP	Kurzlebiges Produkt
KP	Kompromisspunkt
kum	kumuliert
KVR	Kostenvergleichsrechnung
KWM	Kapitalwertmethode
LCC	Life Cycle Cost/Lebenszykluskosten
LLP	Langlebiges Produkt
max	Maximum
min	Minimum
nutz	Nutzen
Obs	Obsoleszenz
OK	Operationskosten
opt	optimal
PA	Produktionsausfall
PDCA	Plan-Do-Check-Act (Demingkreis)
PEK	Personalkosten
PhO	Physikalisches Optimum
ppm	parts per million
RE	Reinvestitionszeiträume
Recyc	Recyclingkosten/Entsorgungskosten
ref	reflektierend
RK	Rohstoffkosten
RT	Reinvestitionszeiträume
RVR	Rentabilitätsvergleichsrechnung
St	Stahlrohr
sys	System, Komponente
SV	Systemvariable
Tech	Technologieanalyse
TR	Teuerungsrate
umg	Umgebung
UMS	(Betriebliches) Umweltmanagementsystem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
verb	Verbraucher
verl	Verlust
vert	vertikal
VF	Verkrustungsfaktor

W	Wartung
w	Wasser
wand	Wand
WK	Wartungskosten
WVZ	Wartungsvorbereitungszeit
WW	Wärmewürfel
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichen

A	m^2	Fläche
A	€	Aufwendungen
A_0	€	Anschaffungskosten oder Wiederbeschaffungskosten
B	kWh	Bedarf
\dot{B}	kW	Leistungsbedarf
C_0	€	Kapitalwert
C_0C	€	abgewandelter Kapitalwert, bezogen auf die Kosten
E	€	Erlöse
E	kJ/kg	Energie
F_{AN}		Anlagenfaktor
F_{BwO}		BwO-Faktor
F_{CFO}		CFO-Faktor
F_{PhO}		PhO-Faktor
H_O	kW/kg	Oberer Heizwert
H_U	kW/kg	Unterer Heizwert
I_{AK}	€	Investitionskosten pro Komponente
K		absolute Rauigkeit
K	€	Kosten
K_0	€	Kapital zum Zeitpunkt $t = 0$
K_I	€	Investitionskosten gesamt zum Zeitpunkt $t = 0$
K_{ges}	€	Gesamtkosten
K_{iV}	€	Gesamtkosten nach Volta
L_N	€	Liquidationserlös oder Restwert der Investition
P	kW	Leistung
\dot{Q}	kW	Wärmestrom
Re		Reynolds-Zahl
R_T	$\text{m}^2\text{K/W}$	Wärmedurchgangswiderstand
R_{Wand}	$\text{m}^2\text{K/W}$	Wärmedurchgangswiderstand der Wand
R_{se}	$\text{m}^2\text{K/W}$	Wärmeübergangswiderstand außen
R_{si}	$\text{m}^2\text{K/W}$	Wärmeübergangswiderstand innen
TZ_{Faktor}		Teuerungsfaktor

T	°C	Temperatur
TR	%	Teuerungsrate
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
V^B	kWh	Verbrauch, Bedarf
\dot{V}^B	kW	Verbrauchsleistung, Bedarf
X		Stückeinheit
Z_{Faktor}		Verzinsungsfaktor (Barwert)
a		Art des Strömungsproblems
a		Koeffizient
a_t	€	Aufwendung zum Zeitpunkt t
c_p	kJ/kgK	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
d_i	m	hydraulischer Durchmesser
dgK	€	durchschnittlich gebundenes Kapital
e_t	€	Erträge zum Zeitpunkt t
f_{Pho}		physikalischer Leistungsfaktor
g	%	Gewichtung
i	%	kalkulatorischer Zinssatz des Investors
j		Anzahl der Einflussfaktoren
j		Häufigkeit der Reinvestitionen
k	W/m ² K	Wärmedurchgangskoeffizient
k_F	€	Fix Kosten
k_V	€	jährliche Betriebskosten
k_v	€	spezifische, variable Kosten
l	m	Länge
m		Mittelwert
m		Steigungskoeffizient
\dot{m}	m/s	Massenstrom
n	a	Betriebslaufzeit gesamt (1 a = 8760 h/a)
p	€	Preis per Einheit
p	Pa	Druck
q		Aufzinsungsfaktor
r		Jahresrendite der Investition
s	m	Isolierstärke
t	a	Betriebsjahr (1 a = 8760 h/a)
t_W	h	Zeitpunkt der Wartung
t_{W0}	h	Zeitpunkt Abschluss der Wartung
u	m/s	Geschwindigkeit
w		Wasser
x		Laufvariable

Ω	°	Raumwinkel
ε		relative Rauigkeit
ζ		Widerstandsbeiwert
η	Pa s	dynamische Viskosität
η		Wirkungsgrad
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
π		Kreiszahl pi
ρ	kg/m ³	Dichte
ΔT	K	Temperaturunterschied
Δeff		Effizienzveränderung

1 EINLEITUNG

Weltweit wandelt sich das unternehmerische Handeln immer mehr. Dabei wird der reine Ökonomismus zunehmend abgelöst durch eine nachhaltige Unternehmensökonomie. Getrieben wird diese Entwicklung durch gesetzliche Vorgaben und die Verantwortung der Unternehmen gegenüber ihren Stakeholdern. Letztlich steht hinter den Veränderungen der Gedanke der ökologischen Nachhaltigkeit als primäres Ziel. Die Auswirkungen des anthropogenen Handelns müssen drastisch reduziert werden, um zukünftigen Generationen gleichwertige Lebensbedingungen zuzusichern. Aufgrund des übermäßigen Ökonomismus im letzten Jahrhundert ist dieses bereits jetzt nur noch bedingt möglich (beispielsweise lässt sich die Erderwärmung durch den Treibhauseffekt nur noch bremsen, aber nicht mehr rückgängig machen).

Die Dissertation von Dirk Volta (2014) *„Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen“* hat eindrucksvoll gezeigt, dass eine Effizienzsteigerung bezogen auf physikalische Grenzwerte eine Optimierung der Systeme und ihre Betriebseigenschaften (Verbräuche, Betriebsfahrweisen) bedeutet. Das Verfahren bietet die Möglichkeit, sowohl Systeme direkt auf die physikalischen Grenzen hin optimiert zu konzipieren als auch bestehende Anlagen über das Physikalische Optimum (PhO) zu evaluieren. Doch welchen Effekt hat die physikalische Optimierung der Betriebsparameter auf die Ökologie und die Ökonomie des Gesamtsystems? Eine zeitgemäße Beurteilung eines Investitionsgutes darf nicht ausschließlich die Aufwendungen während der Betriebsphase berücksichtigen, auch wenn diese in der Regel die größten Effekte aufweisen. Sie muss eine kombinierte Analysemöglichkeit über alle Lebenszyklusphasen anbieten.

Die vorliegende Dissertation soll die Wechselwirkungen zwischen der Ökologie und Ökonomie bei einer Anlagengestaltung zeigen und Werkzeuge für eine Kompromissfindung aufgeben.

Dabei steht eine angemessene Verzinsung aufseiten der Ökonomie einer Ressourceneffizienz auf der Seite der Ökologie gegenüber. Die einbezogenen ökologischen Effekte beruhen auf den Prinzipien der Nachhaltigkeit. Effizienz und Effektivität sind somit wichtige Kernelemente der Betrachtungen.

2 PROBLEMSTELLUNG

Eine einfache, nachvollziehbare Bewertung kann helfen, Komponenten oder Komponentengruppen optimal auf den Anwendungsfall abzustimmen. Dafür werden die Komponenten und Komponentengruppen zu einzelnen Systemen zusammengefasst und auf ihr Optimum hin konstruiert und bewertet. Was unter dem Begriff „optimales“ System zu verstehen ist, kann sich je nach der Beurteilungsprämisse des Betrachters signifikant unterscheiden.

Ein System kann z. B. bewertet werden nach:

- den ökonomischen Eigenschaften
- den ökologischen Eigenschaften
- der Effizienz
- dem Bedienungskomfort
- dem Design
- der Funktionalität
- der Mensch-Produktbeziehung

In der ökologischen Bewertung ist die Energie- und Materialeffizienz inbegriffen, ebenfalls lässt sich die Bewertung der Effizienz in die ökonomische Perspektive integrieren. Die Dependenz zwischen den Umweltbelastungen und dem Material- bzw. Energieverbrauch ist offensichtlich. Relativ frei von individuellen, emotionalen Entscheidungen sind die ökonomischen und ökologischen Bewertungen. Deshalb sollen bei der Anlagengestaltung die Wechselwirkungsanalysen unter diesen Gesichtspunkten implementiert werden.

2.1 ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG

Der Begriff Ökonomie findet seinen Ursprung im antiken Griechenland. Es setzt sich zusammen aus *oikos* (*oikos*), was übersetzt Haus bedeutet, und *nòmos*, das für das Gesetz steht. Der Begriff Ökonomie wurde zusammen als das Haushaltsgesetz von Wirtschaftsgemeinschaften verstanden.

Untersucht ein Ökonom ein System, dann liegt das Augenmerk ausschließlich auf den monetären Einheiten. Bei Anschaffungen, so hat Volta in einer Umfrage ermittelt, sind für die meisten Unternehmen die Anschaffungskosten wichtiger als die Betriebs- und Wartungskosten.¹ Bei Konsumgütern mag diese Ansicht zutreffen. Handelt es sich aber um Investitionsgüter, dann liegen die Betriebskosten in der Regel deutlich über den Investitionskosten und sollten somit nicht unberücksichtigt bleiben.

Auf Lebenszykluskosten basierende Analysen sorgen für eine angemessene betriebswirtschaftliche Bewertung einer Anlage, „von der Wiege zur Bahre“ (cradle to grave).

¹ Vgl. Volta, D. (2014), S. 10

„Die sauberste Energie, der sauberste Strom ist der, der nicht verbraucht wird. In Deutschland ist die Produktion einer Kilowattstunde im Schnitt dreimal so teuer wie die Vermeidung ihres Verbrauchs.“ [2]

Die betriebswirtschaftlichen Betrachtungen gehen von einer Gewinnmaximierung und dabei teilweise immer noch von einem grenzenlosen Wachstum aus. Die Verpflichtung eines Unternehmens seinen Shareholdern gegenüber, eine angemessene Verzinsung des eingebrachten Kapitals zu generieren, bildet die Grundlage wirtschaftlichen Handelns. Jedoch darf diese nicht zu Lasten Unbeteiligter führen. Ausschließlich an der Gewinnmaximierung orientiertes Handeln geht auf Kosten eines großen Teils der Weltbevölkerung. Dazu werden die aufkommenden Umweltkosten externalisiert.

Die ökologischen und sozialen Ressourcen bilden die Grundlage für jegliches Wirtschaften und dürfen nicht zerstört werden. Umgekehrt bildet aber auch nachhaltiger wirtschaftlicher Erfolg die Grundlage dafür, ökologische und soziale Verantwortung überhaupt übernehmen zu können.

„Umweltschutz und nachhaltiger Umgang mit unseren natürlichen Lebensgrundlagen sind daher ein Gebot ökonomischer Weitsichtigkeit und Verantwortung.“ [3]

Ein Unternehmen ist in der Regel bestrebt, eine langfristige Überlebenssicherung am Markt zu erreichen. Dies lässt sich eher durch langfristige, angemessene Verzinsungen erreichen als durch kurzfristige Gewinnmaximierungen. Somit kann auch aus ökonomischer Weitsicht nur ein nachhaltiges Wirtschaften in Betracht gezogen werden, bei dem die Ressourcen nicht durch eine zukünftige Knappheit zu einer Unwirtschaftlichkeit führen.

„Zahlreiche Autoren² verweisen auf das Fehlen ökologisch-ökonomisch orientierter Instrumente im Bereich des ökologieorientierten Rechnungswesens.“ [4]

2.2 ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNG

Auch der Begriff der Ökologie leitet sich aus dem Altgriechischen ab. Er setzt sich zusammen aus dem Wort *oikos* (*oikos*), was übersetzt Haus bedeutet, und *logos* (*λογος*), das für die Lehre steht. Zusammengesetzt hat es die Bedeutung „Lehre vom Haushalt“. Der Haushalt ist unser Globus mit allen Lebensformen und die Ökologie beschreibt die Beziehung aller Lebewesen mit der Umwelt.

Das Umweltbewusstsein der Weltbevölkerung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten deutlich weiterentwickelt. Besonders in den Industrieländern hat die Wertschätzung einer intakten Natur deutlich an Stellenwert gewonnen, obwohl gerade die Industrieländer für einen Großteil der Umweltaufwendungen verantwortlich sind. Die Steigerung des Wertes resultiert aus drastischen Ereignissen, die teilweise katastrophale Auswirkungen angenommen haben. Ressourcenknappheit inkl. Trinkwassermangel, Bodenerosionen durch

² Vgl. Nertinger (2015), S. 3

den Landnutzungswandel, übermäßige Eutrophierung, Versauerung der Weltmeere, Abbau der Biodiversität und der Klimawandel sind nur einige Folgen des direkten oder indirekten anthropogenen Handelns.

Die Weltbevölkerung ist auf ein funktionierendes Ökosystem und dessen Ökosystemdienstleistung angewiesen. Dieser Begriff beschreibt den wirtschaftlichen, materiellen, psychischen und gesundheitlichen Nutzen eines funktionierenden Ökosystems für das Wohlergehen der Menschheit. Ein intaktes Ökosystem ist ein ökonomischer Wert, der innerhalb der Weltbevölkerung individuell wahrgenommen wird.

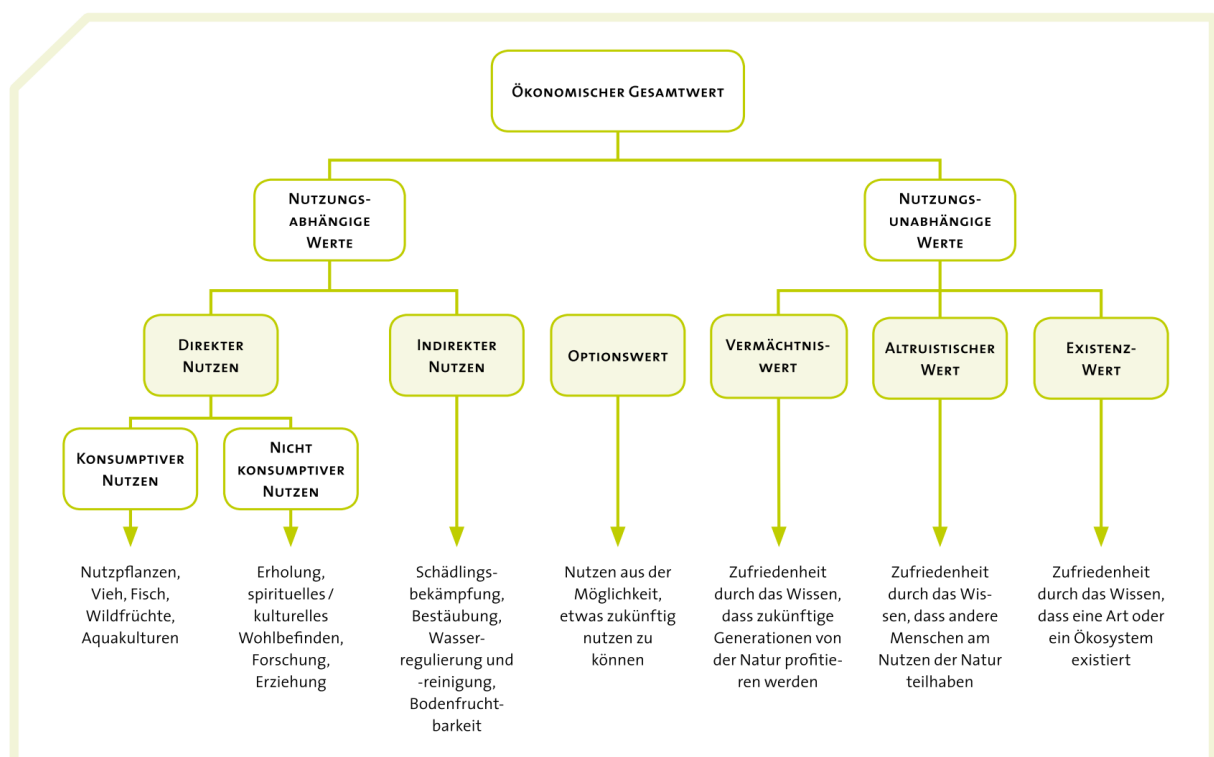


Abbildung 2-1: Aufbau des ökonomischen Gesamtwertes [5]

Der Wert der Umwelt ist elementar für das menschliche Handeln und kann nicht so einfach in monetären Einheiten beziffert werden. Der Umgang mit den vorhandenen Ressourcen muss auch aus ökonomischer Weitsicht nachhaltig sein. Vor allem die „kostenfreien“ Ressourcen (z. B. Luft, Wasser) werden ohne Bedacht verbraucht. Dabei sind sie nur aktuell, auf rein ökonomischer Seite kostenlos. Zukünftige Kosten für Gegenmaßnahmen werden fahrlässig ignoriert, weil sie von den Verbrauchern der Ressourcen externalisiert werden können.

Der Umweltschutz aus wirtschaftlichem Eigeninteresse soll hier als „ökonomischer Umweltschutz“ bezeichnet werden. Er wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts publik gemacht. Damals ging es um den Schutz der Gewässer. Die fortschreitende Industrialisierung hat die Umweltbeanspruchungen weiter beschleunigt. Die Erkenntnis, dass Ressourcen nicht unendlich vorhanden sind, hat in den letzten Jahrzehnten einen Großteil der

Weltbevölkerung erreicht. Trotzdem ist immer noch eine gewisse Zögerlichkeit bei der Umsetzung von Umweltschutzmaßnahmen zu erkennen.

Werden Umweltschutzmaßnahmen angewendet, dann überwiegend auf lokaler Ebene. Dabei sind die räumlichen Umweltauswirkungen abhängig von der Art der Umweltbelastung und den Umgebungsbedingungen. Eine toxische Verschmutzung beispielsweise auf einem trockenen, flüssigkeitsaufnehmenden Boden kann eine sehr kleine räumliche Regenerationsmaßnahme erfordern. Die gleiche toxische Belastung an einem fließenden Gewässer erfordert eine deutlich umfangreichere Maßnahme. Ausgestoßene Treibhausgase, die zum Klimateffekt beitragen, haben einen globalen Effekt und erfordern daher auch eine globale Betrachtung der emittierten Emissionen.

Die Folgen des Klimawandels werden von vielen Institutionen als *die* Herausforderung unserer Zeit angesehen. Der Klimawandel wird das Leben künftiger Generationen sowohl unter ökologischen als auch ökonomischen Aspekten stark beeinflussen.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf den Treibhauseffekt und dessen Ursachen eingegangen. Das bedeutet aber nicht, dass andere Umweltbelastungen zu vernachlässigen sind!

2.2.1 DER TREIBHAUSEFFEKT

Hinter dem Begriff der anthropogenen Treibhausgasemissionen bezeichnet man Emissionen, die durch das menschliche Handeln auf dieser Welt hervorgerufen werden. Dabei werden die Treibhausgasemissionen auf den bekanntesten Vertreter, das Kohlendioxid, normiert. Unter dem Begriff „Kohlendioxid-äquivalente Emissionen“ werden die Hauptkomponenten Kohlendioxid, Methan, Lachgas und unterschiedlichste Fluor- (Chlor-) Kohlenwasserstoffe zusammengefasst. Der Begriff „CO₂-äquivalente Emissionen“ unterscheidet allerdings nicht zwischen fossilen und biogenen Emissionen, was immer wieder zu kontroversen Diskussionen führt. Der größte Anteil der emittierten Treibhausgasemissionen resultiert gleichwohl direkt oder indirekt auf dem Einsatz von fossilen Energieträgern.

Der Treibhauseffekt entsteht durch eine Anreicherung der Treibhausgase in der Atmosphäre. Die von der Sonne eintreffenden langwelligen Infrarotstrahlen passieren die Treibhausgase, währenddessen die zurückgeworfenen kurzwelligen Strahlungen absorbiert werden. Dieses Verhalten wird als Glashauseffekt bezeichnet. Die langwellige Strahlungsenergie wird über die Treibhausgase in Wärmeenergie umgewandelt, was zu einer Erwärmung der Atmosphäre führt. Der Treibhauseffekt wird weiter gesteigert durch eine Verschlechterung der Albedo und durch den ansteigenden Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre.

Die Albedo beschreibt das Rückstrahlvermögen von Oberflächen ins Weltall. Da Schnee- und Eisflächen eine sehr hohe Albedo aufweisen und die Vorkommen durch den Temperaturanstieg drastisch zurückgehen, verschlechtert sich auch der Gesamtwert für die Erdoberfläche.

Eine Erhöhung des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre ist ebenfalls auf der veränderten Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche zurückzuführen. Wärmere Luft erreicht seine Sättigung erst bei einer höheren Wasserdampfmasse. Da Wasserdampf ebenfalls als Treibhausgas gilt, kommt es zu einer weiteren Steigerung der Atmosphärentemperatur. Die globale Erwärmung wird immer noch von vielen Menschen *und leider auch politischen Entscheidungsträgern* angezweifelt, obwohl die Veränderung der Strahlungsflüsse zwischen der Erde und der Atmosphäre wissenschaftlich eindeutig nachgewiesen ist. Lediglich die Effekte der Rückkopplungen sind wissenschaftlich noch nicht eindeutig geklärt.³ Die Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern steuert den größten Anteil an den Emissionen bei. Unter dieser Bezeichnung fasst man u.a. Industriezweige zur elektrischen Energieerzeugung, die gewerbliche und private Raumwärme- und Raumkälteerzeugung sowie den Personen- und Güterverkehr zusammen. Industrielles Handeln emittiert die zweitgrößten Emissionsaufwendungen an Treibhausgasen, gefolgt von der Landwirtschaft.

Dem Verbraucher ist häufig nicht bewusst, dass mit fast jedem Produkt Treibhausgasemissionen direkt oder indirekt in Verbindung stehen. Treibhausgase werden nicht nur beim Betrieb emittiert, sondern auch bei der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, der Distribution und dem Recycling. Eine reine Betrachtung der Betriebseffizienz kann also zu deutlichen Fehlinterpretationen bei der Bewertung einer Anlage führen! Dieses Bewusstsein muss dem Verbraucher verdeutlicht werden, um die Akzeptanz von Umweltschutzmaßnahmen weiter auszubauen.

2.2.2 PARISER KLIMASCHUTZ-ÜBEREINKOMMEN

Die Weltgemeinschaft in Form von 194 Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) hat sich im Dezember 2015 in Paris vertraglich darauf geeinigt, die Klimaerwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen (Paris Agreement, dt. Übereinkommen von Paris). Dieses ehrgeizige Ziel soll nach Möglichkeit auf 1,5 °C weiter verschärft werden. Bereits 1975 gab W. D. Nordhaus das 2-Grad-Ziel für die Klimaerwärmung aus. Nordhaus konnte bereits 1975 ableiten, dass eine Klimaerwärmung aufgrund der anthropogenen Emissionen unausweichlich ist und diese begrenzt werden muss.⁴

Damit das 2-Grad-Ziel erreicht werden kann, sind enorme Anstrengungen notwendig, die staatlich angetrieben und gesteuert werden müssen. Vertraglich ist jeder Staat verantwortlich für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels. Er muss dafür angemessene Strategien und Ziele ausarbeiten und diese anschließend der Vereinten Nationen (UN) übermitteln und erläutern. Die zeitlichen Abläufe, Zwischenziele und letztendlich das Erreichen des finalen Ziels müssen transparent für die UN gestaltet werden. Mögliche Werkzeuge könnten Emissi-

³ Vgl. Fischer, H. (2008), S. 1

⁴ Vgl. Nordhaus, W. D. (1977), S. 39-40f.

onshandelssysteme mit festgelegten Obergrenzen, Treibhausgassteuern und Credit-Mechanismen darstellen. Grundlage aller Bemühungen wird langfristig die Dekarbonisierung sein, also der weitgehende Verzicht auf die Nutzung fossiler Brennstoffe.⁵

Die Notwendigkeit ambitionierter Strategien der Vertragsstaaten wird deutlich, wenn man die Ergebnisse der International Energy Agency (IEA) aus 2015 betrachtet. Die von der IEA veröffentlichte Studie „IEA 2015c“ über den globalen Energieverbrauch in der Zukunft untersucht drei verschiedenen Szenarien, die als Grundlage der Simulationen dienen. In dem ersten Szenario „Current Policies Scenario“, kurz CPS, werden die aktuellen politischen Entschlüsse (Stand Mitte 2015) einbezogen. Inbegriffen sind die tatsächlich erlassenen und schon verabschiedenden Maßnahmen. Das zweite Szenario „New Policies Scenario“ (NPS) berücksichtigt zusätzlich die noch nicht beschlossenen, aber geplanten Maßnahmen. Abschließend wird das Szenario „450 Szenario“ (kurz 450) angesetzt. Dieses beschreibt die notwendigen Maßnahmen, damit das ausgegebene Klimaziel mit einer maximalen Erwärmung auf 2° C im globalen Durchschnitt erreicht werden kann. Die Treibhausgasemissionen müssen dafür so stark begrenzt werden, dass der Gesamtgehalt an Treibhausgasen 450 ppm nicht übersteigt. Dann besteht eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass die Ziele des Pariser Klimaschutz-Übereinkommens gehalten werden können.

Den drei Szenarien nach wird sich der weltweite Energiebedarf weiter vergrößern. Dass liegt zum einen an der wachsenden Weltbevölkerung und zum anderen an dem wirtschaftlichen Wachstum in Schwellen- und Industrieländern.

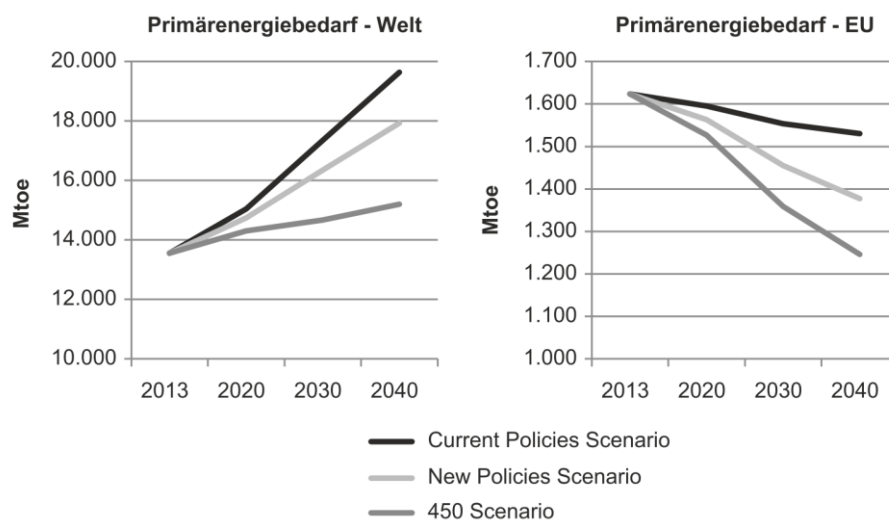


Abbildung 2-2: Energiebedarf der Welt in Millionen Tonnen Öleinheiten [2]

Die EU hingegen wird den Energiebedarf voraussichtlich senken können. Hier sollen Effizienzsteigerungsmaßnahmen einen entscheidenden Beitrag liefern. Durch geplante Gesetze könnte der Primärenergiebedarf weiter reduziert werden. Trotzdem reichen diese

⁵ Vgl. Karcher, S. (2016), S. 4

Maßnahmen noch nicht aus für das Erreichen des Klimaziels. In Abbildung 2-2 ist der konträre Verlauf beim Energiebedarf unter den Szenarien deutlich zu erkennen.

Besonders großes Einsparpotenzial sieht die Studie in den Bereichen Verkehr und Gebäude. Im Verkehrssektor sind energieeinsparende Transportmittel für eine Effizienzsteigerung unerlässlich. In den Haushalten sollen neben guter Isolierung und effizienten Heizungssystemen auch effizientere Haushaltsgeräte für eine Absenkung des Primärenergiebedarfs sorgen.

In Deutschland konnte das Bruttoinlandsprodukt in den vergangenen Jahren gesteigert und der Primärenergieverbrauch gesenkt werden. Das belegt eindrucksvoll, dass eine Entkoppelung des Wirtschaftswachstums vom Energiebedarf möglich ist.⁶

Eine der deutschen Strategien beruht auf der Energiewende, die im Energiekonzept der Bundesregierung festgeschrieben wurde.⁷ Der Kerninhalt ist eine nachhaltige Energieerzeugung, die schrittweise bis 2050 ausgebaut werden soll und final eine Klimaneutralität erreicht. Das zweite Kernelement ist eine Senkung des durchschnittlichen Primärenergiebedarfs aller Verbraucher. Dafür hat die Bundesregierung folgende Meilensteine ausgegeben:

- Der Primärenergieverbrauch soll bis 2050 auf 50 % gegenüber 2008 gedrosselt werden. Als Zwischenhürde ist eine Drosselung um 20 % bis 2020 angegeben.
- Gegenüber 1990 soll die Energieproduktivität bis 2020 verdoppelt werden. Anschließend soll sie bis 2050 um jährlich 2,1 % bis 2050 steigen.
- Der Energiebedarf im Verkehrssektor soll gegenüber 2005 um 40 % bis 2050 gesenkt werden. Bis 2020 sollen bereits 10 % erreicht werden.
- Die jährliche Gebäudesanierungsrate soll verdoppelt werden.
- Senkung des Strombedarfs um 25 % bis 2050 und als Zwischenziel 10 % bis 2020.
- Absenkung des Energiebedarfs für Gebäude um 80 % bis 2050. Bis 2020 sollen es bereits 20 % sein.

Die geplanten Maßnahmen sind Teil des europäischen Klimaschutzziels, inklusive weiterer nationaler Anstrengungen. Deutschland nimmt eine Führungsrolle durch die Energiewende ein, aber auch Deutschland wird weitere Anstrengungen unternehmen müssen, um die Klimaziele des Pariser Klimaschutz-Übereinkommens einzuhalten.

2.3 KONFLIKT DER BETRACHTUNGEN

Die ökonomischen und ökologischen Betrachtungen wirken teilweise konträr, teilweise kohärent zueinander. In den Unternehmen oder selbst in den Privathaushalten ist am häufigsten die ökonomische Betrachtung maßgebend für Investitionsentscheidungen: Wo sind die geringsten Aufwendungen? Welcher Profit kann mit der Investition generiert werden?

⁶ Vgl. Graichen, P., et al. (2017), S. 15

⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2010), S. 4

Die Definition des ökonomischen Prinzips aus dem Goldmann Lexikon stellt das Problem eindrucksvoll dar:

„Ökonomisches Prinzip, Prinzip des rationalen wirtschaftl. Handelns, nach dem ein gegebener Zweck mit geringstmögl. Aufwand bzw. ein höchstmögl. Nutzen mit gegebenen Mitteln erreicht werden soll.“ [11]

Den größtmöglichen wirtschaftlichen Nutzen mit einem geringstmöglichen Aufwand zu erzeugen, widerspricht jeglichem nachhaltigen Verhalten. Dieser Ökonomismus trägt einen großen Schuldanteil an den heutigen Umweltproblemen.

Genau hier versucht diese Arbeit anzusetzen und die unterschiedlichen Ansichten zu kombinieren. Dafür müssen in einem ersten Schritt die Wechselwirkungen untersucht werden. Es fehlen Berechnungsverfahren, mit denen sich die Wechselwirkungen zwischen den ökologischen und ökonomischen Effekten einer Anlagendimensionierung einerseits sowie der Betriebsweise andererseits berechnen lässt. Mit den ökonomischen Kennwerten aus der herkömmlichen Betriebswirtschaft werden die Anlagen in der Regel auf optimale Kostenverhältnisse hin konfiguriert. Würde hingegen ein Team aus Physikern und Ingenieuren die Anlage dimensionieren, dann würde die Anlage eine hohe Effizienz und damit eine gute ökologische Bilanz aufweisen. Jedoch würden die Investitionskosten einer solchen Anlagenkonzeption jegliche wirtschaftliche Berechtigung absprechen. Hier gilt es, die unterschiedlichen Konfigurationen zu einem gemeinsamen „Optimum“ zu führen, welches in der Schnittmenge der beiden Prozesse liegt.

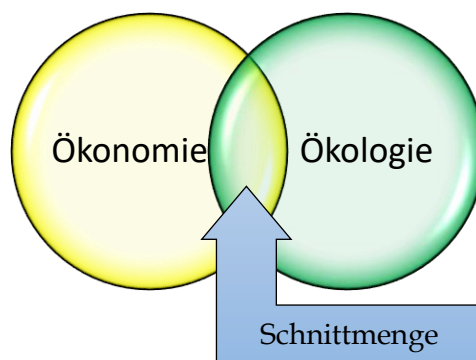


Abbildung 2-3: Schnittmenge Ökonomie und Ökologie

Auf der ökonomischen Seite wird dabei besonderer Wert auf eine umfassende Kostenanalyse über die gesamte Lebenszeit gelegt. Auf der ökologischen Seite wird der Schwerpunkt auf der Reduzierung der Treibhausgase liegen. Dafür muss primär das System effizient gestaltet werden, ohne die sekundären Emissionen der Produktion, der Distribution, der Betriebsstoffe und des Recyclings zu vernachlässigen.

Andere wichtige ökologische und soziale Faktoren bleiben in den ersten Schritten des Analyseverfahren unberücksichtigt, sollten aber dennoch zu einem späteren Zeitpunkt eingebunden werden. In dieser Arbeit wird nicht auf diese Effekte eingegangen.

3 ÖKONOMISCHE BEWERTUNGSVERFAHREN

3.1 EIGENSCHAFTEN DER BETRIEBSWIRTSCHAFT

Die allgemeine Betriebswirtschaft ist als Oberbegriff zu den Aspekten unternehmerischen Handels zu verstehen. Die allgemeine Betriebswirtschaftslehre setzt sich aus fünf großen Untergruppen zusammen: Produktion, Investition, Finanzierung, Marketing sowie – zu einem Punkt zusammengefasst – Forschung und Entwicklung. Alle Gruppen gemeinsam streben einen wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens an.

Die ursprüngliche Betriebswirtschaft strebt nach einer Gewinnmaximierung. Dafür wird von einem grenzenlosen Wachstum ausgegangen. Diese Vorstellung wurde bereits im Jahr 1972 im Bericht " *Grenzen des Wachstums*" vom Club of Rome kritisiert.⁸ Die neuere Literatur lässt ein "gesundes" Wachstum mit einer angemessenen Verzinsung des Eigenkapitals zu, sofern die Nachhaltigkeit gesichert ist.⁹ Dieser Begriff bezieht sich nicht nur auf die Umweltaspekte, sondern auch auf die soziale Nachhaltigkeit.¹⁰ Betriebswirtschaftliche Analysen sind für das Überleben eines Betriebes unerlässlich. Hierbei liegt der Fokus auf den monetären Einheiten. Dies gilt sowohl für Rohstoffe als auch für Hilfsstoffe, Betriebsstoffe und Betriebsmittel, die als monetäre Einheiten bilanziert werden. Die Definitionen der einzelnen Begriffe verdeutlichen ihren Einfluss auf das Betriebsergebnis.

Unter dem Begriff der **Rohstoffe** werden die Hauptbestandteile des Endproduktes zusammengefasst. Ein beispielhafter Rohstoff in der Glasproduktion ist Quarz.

Materialien, die nur einen geringen Anteil an einem Produkt haben, werden als **Hilfsstoffe** deklariert (z. B. Farbstoffe und Additive bei der Glasproduktion). Darunter können auch Montagematerialien wie zum Beispiel Schrauben und Nägel fallen.

Betriebsstoffe hingegen sind nicht im Endprodukt enthalten, was aber nicht bedeutet, dass sie nicht von elementarer Bedeutung sind. Als signifikanter Vertreter der Betriebsstoffe sei hier auf die Energieträger verwiesen.

Unter **Betriebsmittel** werden beispielweise Maschinen oder Gebäude verbucht.¹¹

Die Betriebswirtschaft hat einen hohen Stellenwert bei der betrieblichen Analyse. Ein Unternehmen muss das betriebswirtschaftliche Handeln gegenüber verschiedenen Gruppen rechtfertigen. Diese Interessengruppen, die einen Einfluss auf das Unternehmen haben, werden in der Literatur zusammengefasst unter dem Begriff der Stakeholder.

„Stakeholder sind eine Anspruchsgruppe, welche einen Anspruch gegenüber dem Unternehmen besitzt, weil diese Gruppe von dem Verhalten des Unternehmens beeinflusst wird und selbst auf den Leistungserstellungsprozess einwirken kann. Stakeholder sind z. B. Kunden, Lieferanten, Arbeitnehmer, Öffentlichkeit, Eigenkapitalgeber und Fremdkapitalgeber.“ [13]

⁸ Vgl. Meadows, D. (1972)

⁹ Vgl. Nertinger, S. (2015), S. 60-61f.

¹⁰ Vgl. Müller, D. (2013), 37 K1

¹¹ Vgl. Müller, D. (2013), 4 Kapitel 1

Ein Unternehmen ist auf die Akzeptanz seiner Stakeholder und der gesamten Öffentlichkeit für das betriebswirtschaftliche Handeln angewiesen, sollte es eine langfristige Erfolgsicherung anstreben. Jede größere Investition in einem Unternehmen muss auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft werden. Erst wenn die Wirtschaftlichkeit direkt oder indirekt nachgewiesen ist, sind größere Investitionen gegenüber Stakeholdern gerechtfertigt. Indirekte Vorteile können aus unterschiedlichen Ursachen resultieren. Als Beispiel sei hier auf eine Investition in eine besondere Anlagentechnik hingewiesen. Diese kann wirtschaftlich direkt unrentabel sein, jedoch Wettbewerbsvorteile anderen Marktbegleitern gegenüber einbringen. Durch gezielte Maßnahmen können andere Produktionsgruppen oder Kostenstellen vorangetrieben werden. Bei direkten Vorteilen sollten die betrachteten Zeitintervalle immer geprüft werden.

In der Komponentendeklaration wird zwischen Investitionsgütern und Konsumgütern unterschieden. Das Konsumgut hat in der Regel nur eine geringe Lebensdauer und die Investitionskosten sind entscheidender als die Betriebskosten. Die Investitionsgüter hingegen werden über eine größere Zeitperiode betrieben, wodurch die Betriebskosten an Signifikanz gewinnen.

3.2 EINBEZOGENE BESTANDTEILE DER BETRIEBSWIRTSCHAFT

Der Begriff der Betriebswirtschaft umfasst sehr viele Bereiche, von der lediglich ein geringer Anteil für diese Arbeit relevant ist. Die Arbeit beschränkt sich auf die Lebenszykluskosten von Systemen. Dafür müssen die Betriebs-, die Investitions- und die Entsorgungsaufwendungen bilanziert werden (Kapitel 4). Ferner soll eine begrenzte betriebswirtschaftliche Verknüpfung helfen, das entwickelte Verfahren universell einsetzbar zu gestalten.

Dirk Volta hat in seiner Ausarbeitung den generellen Zusammenhang zwischen den Investitionskosten und den Betriebskosten als Funktion der Gesamtkosten zusammengefasst (K_{IV}):¹²

$$K_{IV} = K_i + K_v \quad (3-1)$$

Er prophezeite, dass mit steigenden Investitionskosten die Betriebskosten absinken. Somit lässt sich schlussfolgern, dass mit steigenden Investitionen die Effizienz des Systems steigen muss.¹³

¹² Vgl. Volta, D. (2014), S. 37

¹³ ebd.

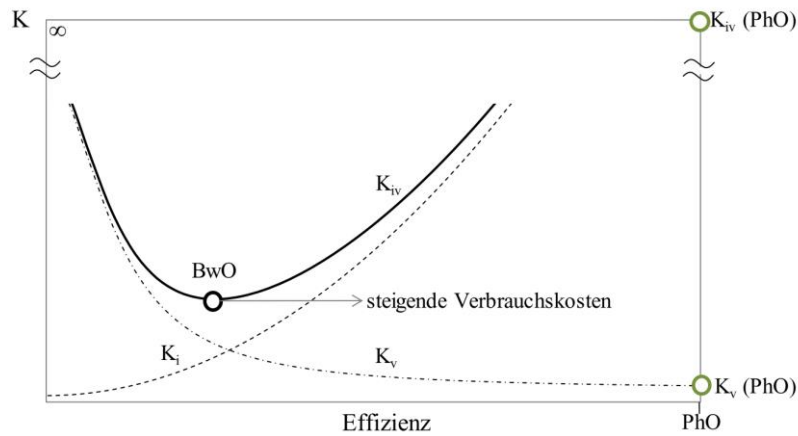


Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen Effizienz und Kosten [1]

In diesem Zusammenhang hat Volta zum ersten Mal das Betriebswirtschaftliche Optimum (BwO) erwähnt. Es deklariert den Punkt mit den niedrigsten Gesamtkosten einer Anlagenkonfiguration. Ausführliche Herleitungen befinden sich in Kapitel 8.

$$BwO = \text{Min}(K_{iV}) \quad (3-2)$$

Folgerichtig hat Dirk Volta (2014) abgeleitet:

- „1. Überproportional steigende Verbrauchskosten rechtfertigen höhere Investitionskosten, um in den Folgejahren das Betriebswirtschaftliche Optimum sicherzustellen.
2. Je höher die Energiekosten steigen, desto stärker wird der Fokus auf das Physikalische Optimum gerichtet werden.“ [1]

Sollte ein System nach dem Physikalischen Optimum ausgelegt werden, dann gehen die Betriebskosten auf ein absolutes Minimum zurück. Die Investitionskosten hingegen streben gegen unendlich.

$$K_{iV}(PhO) = \infty + \text{Min}(K_{iV}) = \infty \quad (3-3)$$

Voltas einperiodische Gleichung eignet sich dazu, unterschiedliche Anlagenkonfigurationen ökonomisch zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Betriebswirtschaftlich handelt es sich um eine **Investitionskostenrechnung**, bzw. eine **Investitionskostenvergleichsrechnung**.

Bei den Betriebskosten handelt es sich lediglich um Verbrauchskosten, die nach der Plankostenrechnung aufgestellt werden. In der Plankostenrechnung werden zukünftige Kosten prognostiziert. Sie können somit dem Management als Entscheidungshilfe dienen.¹⁴ Dafür ist es erforderlich, dass die Kosten dem Verursacher direkt zugeordnet werden können.

¹⁴ Vgl. Wöltje, J. (2011), S. 31

„Nach dem **Verursachungsprinzip** dürfen einem Bezugsobjekt nur diejenigen Kosten zugerechnet werden, die von diesem Objekt auch verursacht wurden. Das Verursachungsprinzip besagt, dass als Kosten nur der bewertete Verzehr von Gütern und Dienstleistungen verrechnet werden darf, welcher durch die periodengerechte, gewöhnliche Leistungserstellung bewirkt wurde.“ [13]

In Voltas Betrachtungen sind keine kalkulatorischen Aufwendungen oder Teuerungen enthalten. Bei den betrachteten Systemen handelt es sich in der Regel um Investitionsgüter, die über einen langen Zeitraum auf die betriebswirtschaftliche Bilanz Einfluss nehmen. Genau aus diesem Grund sind die genannten fehlenden Einflussparameter nicht zu vernachlässigen und sollen in den kommenden Analysen berücksichtigt werden. Im folgenden Abschnitt werden die vorhandenen Investitionskostenrechnungssysteme aus der Betriebswirtschaft auf ihre Einsatzfähigkeit für die Bilanzierung mit dem Betriebswirtschaftlichen Optimum untersucht und bewertet.

3.3 INVESTITIONSKOSTENRECHNUNG

Der Unterschied zwischen den statischen und dynamischen Verfahren besteht in der Betrachtung der Zeitspannen für die Ein- bzw. Auszahlungen. Die statischen Kalkulationen betrachten nicht die unterschiedlichen Zeitpunkte. Es handelt sich in diesem Fall um eine einperiodische Betrachtung. Grundlage ihrer Entscheidung ist die sogenannte Repräsentativperiode einer Investitionsmaßnahme. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Zahlenwerte ihre Gültigkeit zum Investitionszeitpunkt behalten.

Dynamische Investitionsrechnungen hingegen betrachten die Verzinsungen und die Wertverluste der monetären Einheit. Es werden mehrere Zeitperioden betrachtet und die Wertigkeiten der einzelnen Perioden auf den Zeitpunkt der Analyse bezogen. Ein Euro heute ist mehr wert als zu einem späteren Zeitpunkt. Somit werden Kosten und Erträge in der Zukunft abgezinst. Aufgezinst werden aktuelle Aufwendungen, die in der Zukunft bewertet werden.

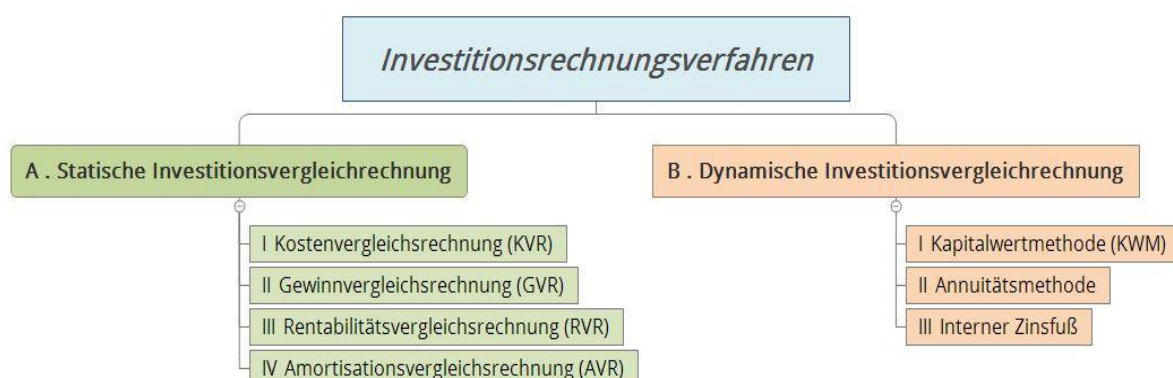


Abbildung 3-2: Investitionsrechnungsverfahren

Bei der Aufzinsung steht in der Regel der Endwert K_n einer **Kapitalanlage** im Interessenvordergrund:

$$K_n = K_0 \cdot (1 + i)^n \quad (3-4)$$

Der Aufzinsungsfaktor fasst in der Regel den Zinsfaktor zusammen:

$$q = (1 + i) \quad (3-5)$$

Daraus folgt:

$$K_n = K_0 \cdot q^n \quad (3-6)$$

Diese Formel gilt nur bei einem konstanten Zinssatz. Sollte sich der Zinssatz verändern, muss eine Reihe berechnet werden:

$$K_n = K_0 \cdot (1 + i_1)^1 + K_1 \cdot (1 + i_2)^2 + \dots + K_{n-1} \cdot (1 + i_n)^n \quad (3-7)$$

Somit müssten alle Jahreswerte nacheinander berechnet werden, nur hierdurch lässt sich eine dynamische Zinseszinsberechnung mit unterschiedlichen Verzinsungen analysieren. Die Abzinsung wird als Kehrwert der Aufzinsung verstanden. Ermittelt werden die Anfangsinvestitionen in eine Kapitalanlage, um einen gewissen Wert nach einer Zeitspanne x zu erzielen.

$$K_n = K_0 \cdot (1 + i)^{-n} \quad (3-8)$$

$$K_n = K_0 \cdot q^{-n} \quad (3-9)$$

3.3.1 KOSTENVERGLEICHSRECHNUNG (KVR)

Die Kostenvergleichsrechnung vergleicht zwei oder mehrere Investitionsalternativen miteinander. Hierbei werden lediglich die statischen durchschnittlichen Kosten ermittelt und gegenübergestellt. Es werden keine Erlöse in die Berechnung einbezogen. Die Kosten können pro Zeitspanne oder pro Leistungseinheit gegenübergestellt werden. Wichtig ist hier die Konsistenz der Einheiten. Mit einbezogen werden die pagatorischen und die kalkulatorischen Kosten. Der Begriff „pagatorische Kosten“ beschreibt die realen Aufwendungen. Unter dem Begriff „kalkulatorische Kosten“ sind die kalkulatorischen Zinsen und die kalkulatorischen Abschreibungen zu verstehen, die in den Bereich der Opportunitätskosten fallen. Somit werden entgangene Erträge aus anderweitigen, gewinnbringenden Anlagealternativen dem Investor als Opportunitätskosten angerechnet:

$$K = K_f + k_v \cdot x + \frac{A_0 - L_n}{n} + \left[\frac{A_0 + L_n}{2} \right] \cdot i \quad (3-10)$$

Die Kosten der einzelnen Systeme werden berechnet und anschließend gegenübergestellt und bewertet.

In den Kosten sind folgende Komponenten inbegriffen:

Die **kalkulatorischen Abschreibungen** in Abhängigkeit der Anlagenlaufzeit. In den **Anschaffungskosten** sind neben den Investitionen für die Anlagentechnik auch die Anschaffungsnebenkosten nach § 255 HGB Absatz 1, Satz 2 einzubeziehen. Unter dem Begriff der Anschaffungsnebenkosten sind alle Aufwendungen zu verstehen, die notwendig sind, um eine Anlage betriebsfertig herzustellen. Von den Anschaffungskosten wird der Restwert abgezogen, der voraussichtlich am Ende der Betriebszeit erwirtschaftet werden kann. Bei der abgebildeten Gleichung (3-11) handelt es sich um eine lineare Abschreibung über die Betriebslaufzeit. Zur Vollständigkeit sei darauf hingewiesen, dass es weitere Möglichkeiten zur Abschreibung gibt (degressive {steuerlich seit 2011 nicht mehr zulässig}, progressive, leistungsbezogene, zeitbezogene). Die lineare Abschreibung stellt aber die Regel dar und wird in den kommenden Betrachtungen eingesetzt.

$$\frac{A_0 - L_n}{n} \quad (3-11)$$

Die kalkulatorischen Zinsen beschreiben die entgangenen Erträge durch nicht getätigte Investition in eine andere gewinnbringende Investitionsalternative. Hier wird das durchschnittlich gebundene Kapital bewertet, dies impliziert auch den Restwert der Anlage. Der Wert i ist der Zinssatz der entgangenen Rendite.

$$\left(\frac{A_0 + L_n}{2} \right) \cdot i \quad (3-12)$$

In den Fixkosten (K_f) sind enthalten:

- Gehälter und Gehälternebenkosten
- Raumkosten
- kalkulatorische Abschreibungen
- kalkulatorische Zinsen

In den variablen Kosten (k_v) werden in der Regel berücksichtigt:

- Materialkosten
- Instandhaltungskosten
- Energiekosten
- Werkzeugkosten
- Leistungslöhne

In der Praxis gibt es einen fließenden Übergang zwischen den Fix- und den variablen Kosten. Pauschal ist nicht festzulegen, welcher Anteil in welcher Position steckt.

3.3.2 GEWINNVERGLEICHSRECHNUNG (GVR)

Eine Gewinnvergleichsrechnung ist durchzuführen, sobald unterschiedliche Gewinne mit den Investitionen erwirtschaftet werden. In diesem Fall verliert eine reine Betrachtung der

Kosten an Aussagekraft. Bei der Gewinnvergleichsrechnung wird geprüft, welche Investition vorteilhafter für den Betriebsumsatz bzw. den Gewinn ist (Gleichung(3-13)). Eine GVR kann auch angewendet werden, um eine Neuinvestition in eine Produktionsmaschine zu überprüfen. Hier kann eine effizientere Technik klare Vorteile generieren.¹⁵

$$G = \text{Erlöse (E)} - \text{Kosten (K)} \quad (3-13)$$

$$G = (p \cdot x) - (k_v \cdot x) - K_f - \left[\frac{A_0 - L_n}{n} \right] - \left[\frac{A_0 + L_n}{2} \right] \cdot i \quad (3-14)$$

Deutlich sind die Parallelen zu der vorherigen KVR in Gleichung (3-14) zu erkennen. Auch bei dieser Berechnung handelt es sich um eine statische Betrachtung in der Betriebswirtschaftslehre. Das Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung kann dem Resultat der Gewinnvergleichsrechnung widersprechen. Ein Grund dafür kann der Einfluss der unterschiedlichen Ertragsbilanzen sein. In der Gleichung werden die Gewinne und Kosten einer Produktionseinheit (x) eingebunden.

3.3.3 RENTABILITÄTSVERGLEICHSCHEUNUNG (RVR)

Die Rentabilitätsrechnung bezieht zusätzlich das durchschnittlich gebundene Kapital in die Berechnung mit ein. Aus diesem Grund wird hier auch von einer absoluten Vorteilhaftigkeit gesprochen. Der Investor erwartet eine Rentabilität seiner Investition. Damit das durchschnittlich gebundene Kapital ermittelt werden kann, unterscheidet man zwischen abnutzbarem und nichtabnutzbarem Anlagevermögen (AV). Zum nichtabnutzbaren Anlagevermögen zählen in der Regel dauerhafte Werte wie z. B. Grundstücke. Zum abnutzbaren Anlagevermögen gehören z. B. Maschinen. Nicht abnutzbares Anlagevermögen wird in den Berechnungen zu einhundert Prozent berücksichtigt. Bei dem abnutzbaren Anlagevermögen wird die Hälfte des Wertes berücksichtigt, unter der Voraussetzung, dass die Anschaffungskosten durch eingehende Einnahmen kontinuierlich und gleichmäßig freigesetzt werden.

$$r = \left\{ \frac{(p - k_v) \cdot X - K_f - \left[A_0 - \frac{L_n}{n} \right]}{dgK} \right\} \cdot 100 \quad (3-15)$$

Die Rentabilität einer Investition wird in der Gleichung auf das durchschnittlich gebundenen Kapital (dgK) bezogen.

3.3.4 AMORTISATIONSVIRGLEICHSCHEUNUNG (AVR)

Die statische Amortisationsrechnung betrachtet die Amortisationszeit einer Investition. Hierbei werden die Investitionen durch die Rückflüsse kompensiert. Ein wichtiges Kriterium hierbei ist, dass sich eine Investition früher amortisiert als die geplante Betriebslaufzeit der Investitionsanlage.

¹⁵ Vgl. Müller, D. (2013), S. 410

Die Amortisationsvergleichsrechnung ermittelt einen Zeitwert, bei dem die Aufwendungen durch die Gewinne ausgeglichen werden. Die kumulierte Anlagenbilanz, bestehend aus der jährlichen Differenz zwischen dem Ertrag minus den Aufwendungen, wird aufsummiert, bis die Investitionsaufwendungen ausgeglichen sind. Unterschiedliche Anlagen werden nach der Kürze der Amortisationszeit bewertet. Bei der Berechnung kommen zwei verschiedene Berechnungsverfahren zum Einsatz.

Die erste Variante berechnet einen Durchschnitt über alle Betriebsjahre:

$$AZ = \frac{\text{Kapitaleinsatz } [A_0 - L_n]}{\text{durchschn. jährl. Gewinn} + \text{jährl. Abschreibung}} \quad (3-16)$$

Die zweite Methode schaut sich jährlich variable Werte an und kumuliert diese auf. Dieses Verfahren wird bei den dynamischen Verfahren angewendet.

3.3.5 KAPITALWERTMETHODE (KWM)

Bei der Kapitalwertmethode handelt es sich um eine dynamische Investitionsrechnung. Sie bildet die Grundlage aller dynamischen Vergleichsrechnungen und gibt an, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit eine Investition als vorteilhaft bezeichnet werden kann. Daher wird die Kapitalwertmethode auch als Entscheidungsregel bezeichnet. Der Investor gibt seine Zinsansprüche an, und über die Ein- und Auszahlungen kann eine Unter- bzw. eine Überdeckung nachgewiesen werden.

Zahlungen in der Zukunft werden auf den aktuellen Wert am Investitionszeitpunkt t_0 angepasst. Diese angepassten Positionen werden anschließend als Barwert bezeichnet.

„Mit dem Kapitalwert kann die Vorteilhaftigkeit einer Investition beurteilt werden. Der Kapitalwert ist der Gegenwartswert des Zahlungsstroms einer Investition, wobei der Zahlungsstrom (Saldo aus Ein- und Auszahlungen) mit dem Kalkulationszinsfuß (i) abgezinst wird.“ [14]

Folglich muss der Kapitalwert, der aus der Summe der barwertigen Ein- und Auszahlungen gebildet wird, größer als null sein, damit eine Vorteilhaftigkeit gegeben ist.

$$C_0 = -A_0 + (e_1 - a_1) \cdot (1+i)^{-1} + (e_2 - a_2) \cdot (1+i)^{-2} + \dots + (e_n - a_n) \cdot (1+i)^{-n} + L_n \cdot (1+i)^{-n} \quad (3-17)$$

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} \right] + L_n \cdot (1+i)^{-n} \quad (3-18)$$

3.3.6 AMORTISATIONSMETHODE

Bei der dynamischen Amortisationsrechnung wird der Zeitraum ermittelt, nach dem die Aufwendungen durch die Erträge ausgeglichen werden. Die Erträge sind auf den jeweiligen Barwert bezogen. Die Amortisationszeit muss zwingend geringer sein als die geplante Anlagenbetriebslaufzeit. Zusätzlich unterscheidet sich die dynamische Amortisationsrechnung von der statischen durch eine Einbeziehung der Verzinsungen. Mathematisch wird die Betriebsdauer analysiert, an dem der Kapitalwert als Funktion der Zeit auf null absinkt.

3.3.7 INTERNER ZINSFUß

Der interne Zinsfuß wird in der Literatur auch als der interne Zinssatz bezeichnet. Er gibt den Zinssatz an, bei dem die Aufwendungen am Ende der Betriebslaufzeit gleich den Erträgen sind. Somit kann man den maximalen Zinssatz für den Investor festlegen, bei dem die Anlage sich nach dem Kapitalwert noch positiv bewerten lässt. Ist der interne Zinsfuß gleich oder größer als der Mindestzinssatz, dann ist die Anlage vorteilhaft.

$$i_{int} \geq i_{min}$$

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{e_t - a_t}{(1 + i_{int})^t} \right] + L_n \cdot (1 + i_{int})^{-n} = 0 \quad (3-19)$$

Die Gleichung muss anschließend nach dem internen Zinsfuß aufgelöst werden.

4 LEBENSZYKLUSKOSTEN

Unter der Berücksichtigung dessen, dass es sich bei langlebigen Wirtschaftsgütern in der Regel um Investitionsgüter handelt, ist eine Betrachtung der gesamten Lebenszykluskosten (engl. Life cycle costs, LCC) empfehlenswert. Die Entscheidungen für eine Investition in der Gegenwart haben einen Einfluss auf die komplette Güterbetriebslaufzeit. Im Bereich von Werkzeugmaschinen erreichen Anlagen Standzeiten von 50 Jahren und mehr. Die VDI-Richtlinie 2884 definiert die LCC als die totalen Kosten eines Systems über seine Lebensdauer.¹⁶ Dabei unterscheidet die Richtlinie, aus welcher Sicht die LCC-Analyse durchgeführt wird, nämlich der des Betreibers oder der des Herstellers. Die VDI-Richtlinie 2884 verweist auf vier Themenbereiche, die bei der Erstellung einer Analyse über das LCC wichtig sind, damit anschließend auch die Kosten optimiert werden können:

- „Prognose: Die Lebenszykluskosten und -erlöse sowie nicht monetär erfassbare Folgewirkungen von Entscheidungsalternativen sind zu prognostizieren. Hierdurch lassen sich Alternativen vergleichend beurteilen.“ [15]
- „Abbildung: Die zu ermittelnden Faktoren müssen so dargestellt werden, dass sie die Entscheidungsfindung reell unterstützen.“ [15]
- „Erklärung: Die Relationen bei der Entstehung von Kosten und Erlösen sollen nicht nur erkannt, sondern auch erklärt werden, da erst dann eine aktive Wirkung auf Kosten, Zeit und Qualität möglich wird.“ [15]
- „Gestaltung: Schon zu Beginn des Entscheidungsprozesses sollen Möglichkeiten zur optimierten Gestaltung und Beeinflussung von Kosten und Erlösen erkannt und Potenziale zur Kostensenkung genutzt werden.“ [15]

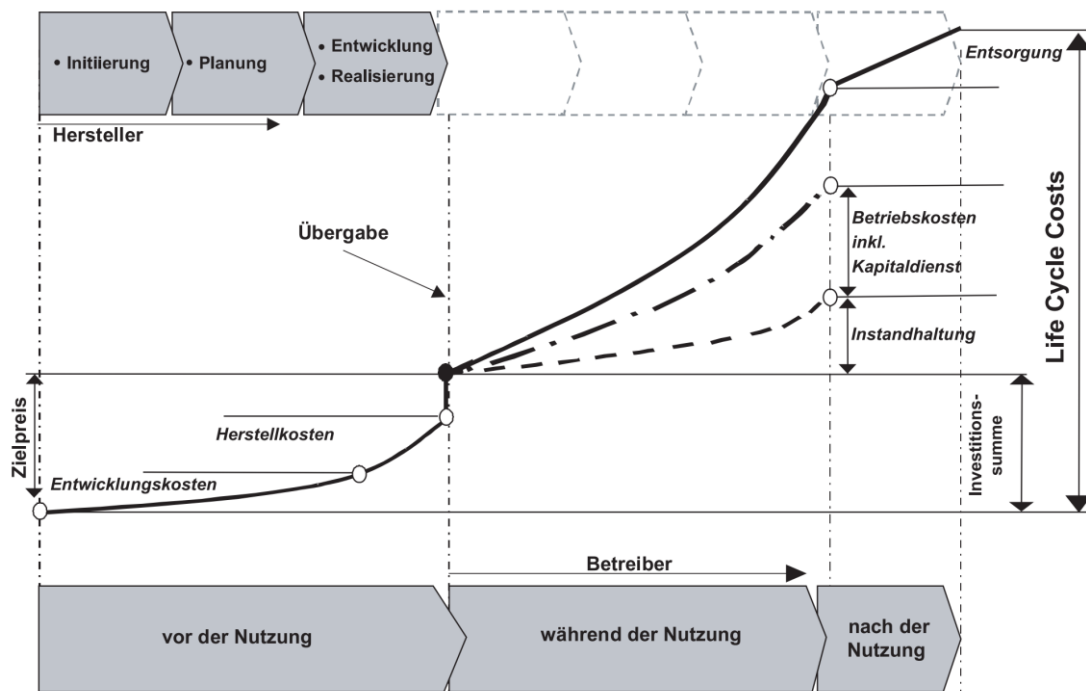


Abbildung 4-1: Lebenszykluskosten LCC [15]

¹⁶ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2884 (2005), S. 4

Für eine aussagekräftige Analyse über das LCC müssen die Investitions-, Betriebs-, Instandhaltungs- und Recyclingkosten am Lebensende bekannt sein (Abbildung 4-1). Dafür sind Instandhaltungsstrategien, Einsatzhäufigkeiten, Nutzungsdauer und mindestens noch die Produktionsmittel festzulegen. Abbildung 4-2 zeigt die Einbindung der LCC-Analyse in den regulären Beschaffungsprozess.

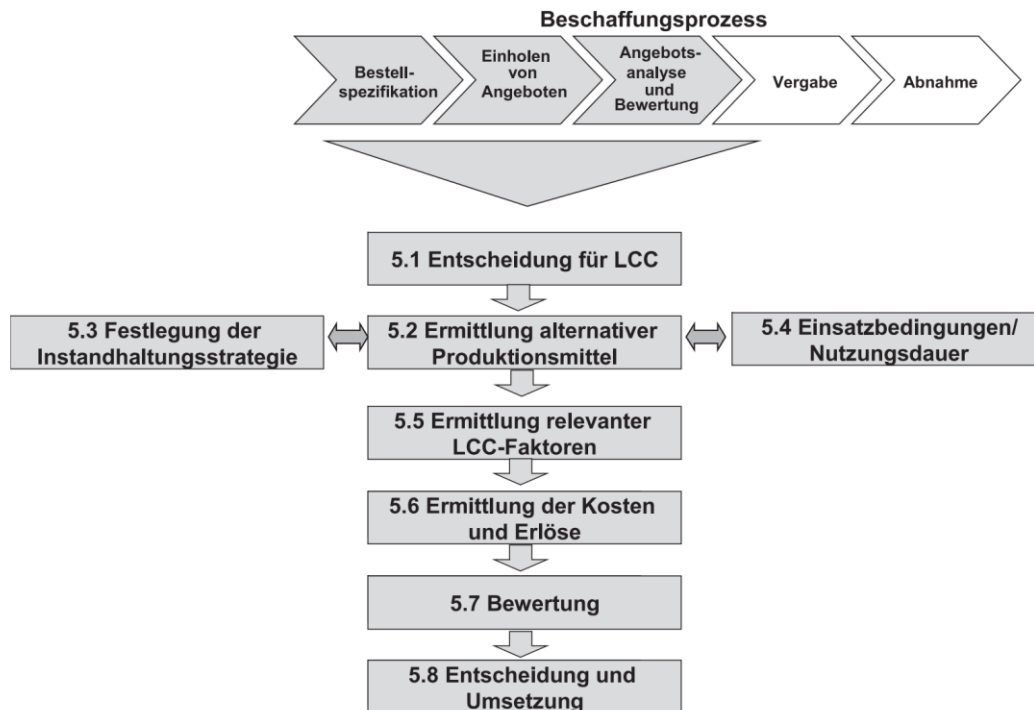


Abbildung 4-2: LCC im Beschaffungsprozess [15]

Für die Einbindung der Investitionsrechnung in die LCC gibt es keinen Standard. Ob eine statische Investitionsrechnung nach dem einperiodischen System stattfindet oder eine mehrperiodische Investitionsrechnung berücksichtigt wird, die zusätzlich dynamische Effekte einschließt, überlässt die VDI-Richtlinie 2884 dem Nutzer. Es existiert lediglich der Hinweis, dass die dynamischen Investitionsrechnungen eher einer ganzheitlichen Betrachtung entsprechen.

5 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNGSVERFAHREN

Die ökologische Bewertung von Systemen und ihre Auswirkungen auf die Umwelt hat weltweit an Bedeutung gewonnen und muss zwingend in der Komponentenauslegung berücksichtigt werden. Den Unternehmen stehen für die Beurteilung der anthropogenen Umweltauswirkungen zahlreiche ökologieorientierte Bewertungsverfahren zur Verfügung. Obwohl unterschiedliche Umweltauswirkungen bilanziert werden, ist die Lösung der Problematik eine grundlegende Reduktion des natürlichen Ressourcenbedarfs.

5.1 NACHHALTIGKEIT

Das Thema Nachhaltigkeit ist aktuell sehr präsent, aber nicht neu. Bereits 1713 hat Hans Carl von Carlowitz eine Abhandlung mit dem Titel „Syvicultura oeconomica“ veröffentlicht, in der er die starke Abholzung anprangert und eine nachhaltige Nutzung fordert.

“Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” [16]

Die Nachhaltigkeit basiert auf drei Dimensionen, die auch als das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit deklariert werden.¹⁷



Abbildung 5-1: Das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit

Die **ökonomische Dimension** entspricht der ursprünglichen Betrachtung der Betriebswirtschaft, jedoch wird die kurzfristige Gewinnmaximierung gegen einen langfristigen Wertezuwachs ausgetauscht. Die langfristige Betrachtung spielt eine ganz entscheidende Rolle, durch sie werden Widersprüche in den Dimensionen kompensiert.

Die **ökologische Dimension** behandelt die Auswirkungen des unternehmerischen Handelns auf die Umwelt.

Die **soziale Dimension** wird auch häufig als die gesellschaftliche Dimension deklariert. Der Einfluss des unternehmerischen Handelns auf die aktuelle Generation und zukünftigen Generationen wird bewertet.

In einigen literarischen Werken wurde noch eine weitere Dimension hinzugefügt, die kulturelle Dimension. Sie implementiert Werte, die das kulturelle Miteinander beeinflussen.¹⁸

¹⁷ Vgl. Colman, B. (2016), S. 8

¹⁸ ebd.

Als Handlungsanweisung kann die Norm DIN ISO 26000 „Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung“ genutzt werden. Diese beschreibt einen Großteil der gesellschaftlichen Verantwortung.¹⁹

Nertinger (2015) fordert in seiner Arbeit „Carbon and Material Flow Cost Accounting“:

„Der Übergang zu einer Nachhaltigen Wirtschaftsweise ist ein dringendes Erfordernis um weiterhin effektiv und effizient Wirtschaften und materiellen Wohlstand sichern zu können und vor allem auch, um die natürlichen Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen zu bewahren.“ [4]

Nachhaltiges Handeln in Unternehmen kann nicht nur die laufenden Materialverbräuche und somit direkte Kosten senken. Vielmehr kann es auch eine größere Unabhängigkeit von volatilen Eingangsgrößen erreichen und somit positiv auf die dauerhafte Betriebssicherung wirken. Ebenfalls steigt mit dem Nachweis über ein nachhaltigeres Wirtschaften die Akzeptanz bei den Stakeholdern, was sich ebenfalls positiv auf die langfristige Unternehmenssicherung auswirkt.

Der Begriff der Nachhaltigkeit hat eine große Anzahl an Facetten und wird zu häufig unüberlegt eingebracht, was zu einer gewissen Belanglosigkeit führen kann. Dabei ist die Bedeutung der Nachhaltigkeit bezogen auf die Energie- und Ressourcenschonung elementarer als je zuvor. Ein einfaches Tool für die Bilanzierung im wirtschaftlichen und privaten Bereich kann helfen, dass humane Handeln zu verdeutlichen und zu einer Bewusstseins-erweiterung der Konsumenten führen.

Die Umsetzung der Nachhaltigkeit basiert auf drei Strategien Effizienz, Suffizienz und Konsistenz.

Die **Effizienzstrategie** untergliedert sich in einen ökologischen und einen sozialen Bereich. Der ökologische Bereich kohäriert mit dem Verfahren des Physikalischen Optimums und ist somit eine optimale Brücke zwischen den Betrachtungen. Die soziale Effizienz betrachtet die Gerechtigkeit der Ressourcenverteilung sowohl gegenüber der aktuellen als auch der zukünftigen Weltbevölkerung. Ein Unternehmen, das in der Gegenwart Ressourcen verbraucht, die nicht adäquat regenerieren können, sorgen für eine weitere Ressourcenverknappung zukünftiger Generationen.

Sollte die Nachhaltigkeitsstrategie ausschließlich auf einer Effizienzsteigerung basieren, besteht die Gefahr, dass sich keine Verbesserungen einstellen. Die Hauptgründe können in drei Effekte kategorisiert werden:

Sinkt der Preis einer Ware durch eine verbesserte Effizienz in der Herstellung, kann das zu höheren Absätzen am Markt führen. Dadurch kann es zu einem Mehrverbrauch an Ressourcen kommen. Deshalb wird hier vom **Reboundeffekt** gesprochen.

¹⁹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN ISO 26000* (2011), S. 18ff.

Der **Wachstums-/Mengeneffekt** beschreibt ein Sinken der Ressourcenentnahme. Sollte sich die Ressource nicht äquivalent zur Entnahme erholen können, dann führt dies nur zu einer längeren Entnahmezeit, bis die Ressourcen endgültig aufgebraucht sind.

Der **Leakageeffekt** beschreibt die Verschiebung der Nachhaltigkeit auf nach- oder vorge-lagerte Lebensphasen der Produkte. Als Beispiel sei hier auf eine Effizienzsteigerung wäh-rend der Betriebsphase hingewiesen, welche aber in der Produktionsphase zu einer Erhö-hung des Ressourcenverbrauchs führt.

Der Leakageeffekt lässt sich nur durch eine Betrachtung der gesamten Lebenszyklusphase von Systemen verhindern.

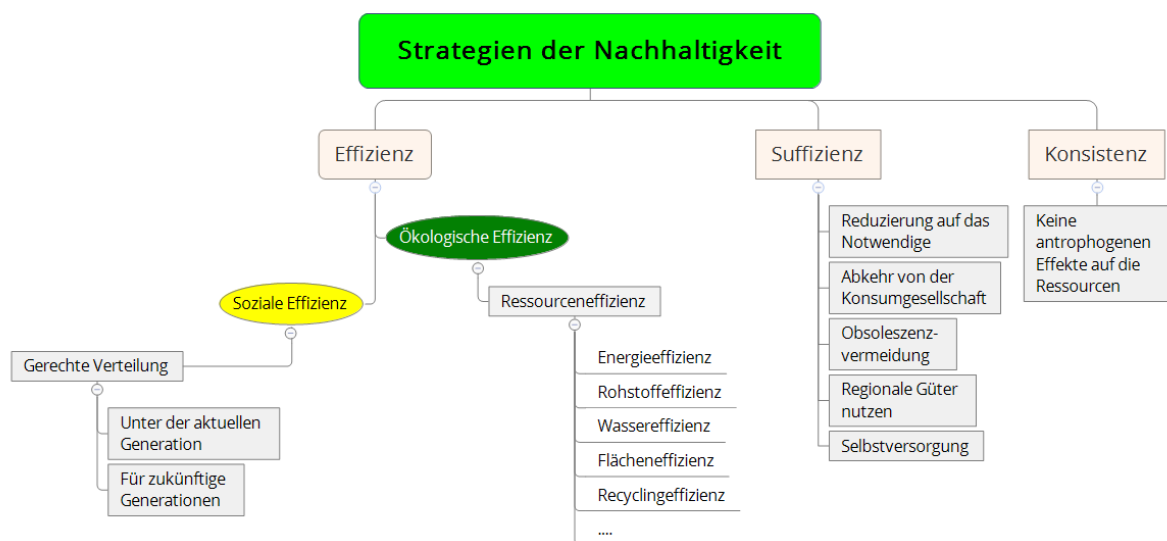


Abbildung 5-2: Strategien der Nachhaltigkeit

Die **Suffizienzstrategie** beschreibt die Reduzierung auf das wirklich Notwendige. Es sollen die wichtigen Bedürfnisse ausreichend gedeckt werden. Das bedeutet eine Abwendung von der vorhandenen Konsumgesellschaft. Güter und Dienstleistungen sollen auf ein Minimum reduziert und langfristig genutzt werden (siehe auch Kapitel 16). Eine verstärkte Nutzung regionaler Güter und wenn möglich eine Selbstversorgung werden priorisiert. Somit hebt der Gedanke der Suffizienz den beschriebenen Reboundeffekt aus, indem er eine absolute Ressourcenschonung betrachtet. Nertinger (2015) bezeichnet die Suffizienzstrategie nicht als technisches Lösungskonzept, sondern als Verhaltensansatz, der auf soziale und gesellschaftliche Innovationen abzielt.²⁰

Natürlich sind es die wohlhabenden Industrienationen, die aufgerufen sind, sich des Gedankens der Suffizienz anzunehmen. Arme Bevölkerungsschichten vor allem aus Entwicklungsländern leben deutlich unterhalb der vertretbaren Ressourcennutzung.

²⁰ Vgl. Nertinger, S. (2015), S. 35

Die **Konsistenzstrategie** ist die am schwierigsten umzusetzende der drei Strategien und gilt daher auch als die Königsdisziplin. Nach dem Begriff der Konsistenz dürfen der Natur nur die Ressourcen entnommen werden, die auch wirklich nachwachsen bzw. regenerieren. Somit wird kein Potenzial der Ressourcen verbraucht. Bezogen auf die Treibhausgase bedeutet das, dass nur so viel ausgestoßen werden darf, wie die Atmosphäre absorbieren kann. Es findet keine weitere Anreicherung von klimaschädlichen Gasen in der Atmosphäre statt. Die Industrie richtet sich nach den natürlichen Verläufen des Ökosystems.²¹ Das Problem des Wachstumseffektes wäre ausgebremst und die soziale Nachhaltigkeit zukünftiger Generationen gesichert. Dafür bedürfte es aber drastische Maßnahmen, die das gesamte Weltwirtschaftssystem ins Wanken bringen würden.

5.2 NACHHALTIGKEITSCONTROLLING

Das Nachhaltigkeitscontrolling basiert auf den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit und hilft dem Unternehmen, eine kontinuierliche Verbesserung in seinen ökonomischen, ökologischen und sozialen Leistungen zu erreichen. Es fungiert als strukturierendes Informations-, Entscheidungs- und Planungswerkzeug für alle Hierarchieebenen des Unternehmens. Es unterstützt die Unternehmensführung dabei, die Prozessstrukturen nachhaltig zu gestalten und den Gedanken der Nachhaltigkeit aktiv in der Unternehmenskultur zu verankern. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, dass ursprüngliche Rechnungswesen, das in der Regel die Grundlage des unternehmerischen Handelns darstellt, mit den Aspekten der Ökologie und Soziologie zu kombinieren.

Beim Nachhaltigkeitscontrolling werden drei unterschiedliche Ansätze der Bilanzierung unterschieden.

1. *Ökonomischer Ansatz*

Über ein Umweltkostenmanagement werden die Umweltaufwendungen mit ökonomischen Faktoren in die Bilanz eingebunden. Anschließend erfolgt eine ökonomische Bewertung.

2. *Ökologischer Ansatz*

Als Entscheidungs- und Steuerungsgrundlage dienen die ökologischen Umweltaufwendungen.

3. *Ökonomisch-Ökologischer Ansatz*

Sowohl die ökonomische als auch die ökologische Bewertung werden durchgeführt, Entscheidungen basieren auf beiden Kennwerten. Die Gewichtung der einzelnen Faktoren zueinander muss vorher definiert und festgehalten werden.

Eine Monetisierung der Umweltauswirkungen gestaltet sich schwierig und ist zudem von den lokalen Bedingungen abhängig. Jeder Umweltauswirkung muss somit ein lokaler Wert

²¹ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4800 Blatt 1* (2016), S. 7

zugeordnet werden, was die Vergleichbarkeit von Produktionsanlagen an unterschiedlichen Standorten erschwert. Daher soll in den folgenden Überlegungen der Ökonomisch-Ökologische Ansatz betrachtet werden. Eine Möglichkeit, die ökonomischen Effekte des unternehmerischen Handelns zu bewerten, bietet das betriebliche Umweltmanagement.

5.3 BETRIEBLICHES UMWELTMANAGEMENT (UMS)

Das Betriebliche Umweltmanagement (UMS) hat die Aufgabe, die Umweltauswirkung des Betriebes auf ein Minimum zu reduzieren, und leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit. Aus diesem Grund fallen die Begriffe Betriebliches Umweltmanagement und Betriebliches Nachhaltigkeitsmanagement im gleichen Zusammenhang, obwohl das Umweltmanagement nur die ökologische Säule der Nachhaltigkeit stützt. Für die Verringerung der anthropogenen Effekte auf die Umwelt stehen dem UMS eine Reihe an Maßnahmen zur Verfügung. Die bekanntesten Umweltmanagementsysteme basieren auf der DIN EN 14001 und dem EMAS (Eco Management and Audit Scheme). Weitere Empfehlungen befinden sich in der DIN EN 14004. Sowohl die DIN EN 14001 als auch das EMAS haben am Markt einen hohen Stellenwert und können zum Qualitätsmanagement DIN ISO 9001 hinzugefügt werden. Erweitert werden kann das UMS mit der DIN EN 16247 oder der DIN EN ISO 50001 (Energieeffizienz).

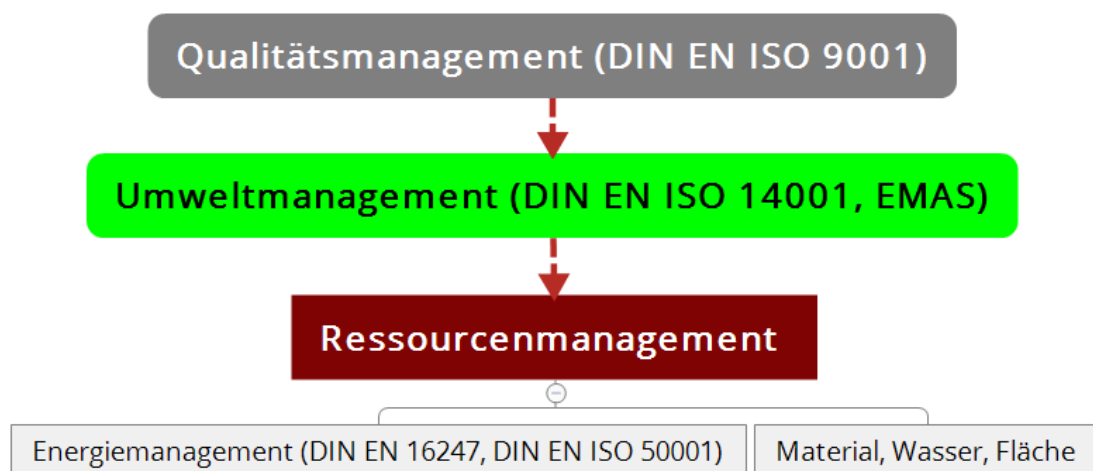


Abbildung 5-3: Zusammenhang der Managementsysteme

Beide Managementsysteme (DIN EN ISO 14001, EMAS) basieren auf einer Anwendung des PDCA-Zyklus (Abbildung 5-5, Demingkreis) und streben eine kontinuierliche Verbesserung an. Der Zyklus kann dabei kontinuierlich oder in festgelegten Zeitintervallen durchlaufen werden. Festzuhalten ist, dass das Verfahren EMAS insgesamt höhere Anforderungen an das Umweltmanagement stellt. Das 2010 in Kraft getretene EMAS III fordert eine Bilanzierung der Energie- und Materialeffizienz, Wasserverbrauch, Abfallbilanzierung und den jährlichen Ausstoß an Treibhausgasen. Die DIN EN ISO 14001 unterscheidet sich von der strengeren EMAS, indem weniger strenge Vorgaben auferlegt werden. Der Betrieb

muss keine Umwelterklärung abgeben und sich zu keiner Umweltleistung verpflichten. Lediglich die kontinuierliche Verbesserung sollte gewährleistet werden. Somit kann das EMAS eine deutlich höhere Akzeptanz bei ihren Stakeholdern generieren.

Ein Umweltmanagementsystem erzeugt lediglich einen Anreiz zur Umweltentlastung, es liefert keine „Werkzeuge“ zum Bilanzieren der Umweltbelastungen und keine Lösungsansätze für weitere Belastungsreduktionen (z. B. Potenziale zur Effizienzsteigerung).

Der organisatorische Aufwand für die Implementierung eines Umweltmanagementsystems in ein kleines bzw. mittelständisches Unternehmen sorgt häufig für eine Ablehnung der Systeme. Die resultierenden Vorteile eines solchen Systems werden hingegen unterbewertet. Ein normiertes Managementsystem kann helfen, die Qualität zu verbessern. Darüber hinaus wird die Ressourceneffizienz gesteigert, was zu einem Absinken der monetären Aufwendungen und gleichzeitiger Minderung der Emissionen führt.

5.4 RESSOURCENEFFIZIENZ

Weber et al. (2015) haben in dem Bericht „*Ressourcenmanagement-Managementsysteme und ihr Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz*“²² den Begriff der Ressourcen in drei Kategorien unterteilt. Die erste Kategorie umfasst die Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital, Boden, evtl. noch Wissen. Alle Produktionsverfahren der ersten Kategorie werden als volkswirtschaftliche Ressourcen definiert. In der zweiten Kategorie sind die betriebswirtschaftlichen Ressourcen, die zum Teil aus der Unternehmensanalyse stammen, zusammengefasst. Dazu gehören die finanziellen, physischen, humanen, organisatorischen und die technologischen Ressourcen eines Unternehmens. Die letzte Kategorie ist die entscheidende und zugleich die für die weiteren Betrachtungen wichtigste Kategorie, die **natürlichen Ressourcen**. Die Bestandteile der natürlichen Ressourcen sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

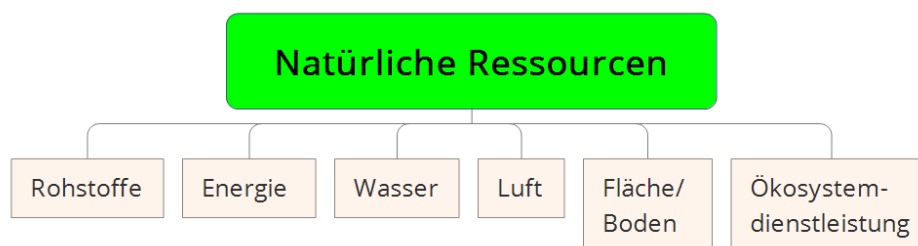


Abbildung 5-4: Natürliche Ressourcen. Eigene Darstellung nach [19]

Für die Unternehmen sind auf der Inputseite vor allem die Ressourcen Energie, Rohstoffe, Wasser und Fläche relevant. Luft wird als kostenfreie Ressource auf der Inputseite vernachlässigt. Auf der Outputseite bilden die natürlichen Ressourcen Luft, Wasser und Boden die Senke zur Absorption der Emissionen und Abfälle.

²² Vgl. Weber, M. (2015), S. 8

Die Umweltkosten für die CO₂-äquivalenten Emissionen dürfen im Rahmen eines Umweltkostenmanagements nicht externalisiert werden. Eine Monetisierung aller gewerblichen Konsumenten, z. B. durch Emissionssteuern, könnte die Emissionsbekämpfung beschleunigen.

Werden im Folgenden die Begriffe Ressourcen oder Ressourcenverbrauch genannt, dann handelt es sich dabei um die natürlichen Ressourcen.

Der Ressourcenverbrauch ist seit dem Beginn der Industrialisierung kontinuierlich gestiegen und überschreitet substanziell die natürliche Regenerationsfähigkeit der Umwelt. Dies führt in der Zukunft unweigerlich zu einem Ressourcenkonflikt. In einem begrenzten Lebensraum, den die Erde nun einmal darstellt, ist ein unbegrenzter Abbau der Ressourcen nicht tragbar.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hat 2012 formuliert:

„In einer begrenzten Welt kann es keine unbegrenzte Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen geben. Nachhaltiges Wirtschaften erfordert eine Entkopplung von Wohlfahrt und Ressourcennutzung durch grundlegende Innovationen und die Aufwertung überlebenswichtiger Ökosystemleistungen.“ [21]

Diese Erkenntnis wurde bereits im Jahre 1972 durch den Club of Rome veröffentlicht und trotzdem sind die Bestrebungen zu zaghaf. ²³ Kostenfreie Ressourcen wie die Luft werden betriebswirtschaftlich nicht bilanziert und ohne Bedacht verbraucht, was letztendlich zu einer Externalisierung der Kosten führt. Die Kombination der ursprünglichen Ökonomie mit den tatsächlichen Ressourcen der Natur ist eine Herausforderung des 21. Jahrhunderts. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz hat neben der Umweltschonung auch positive Auswirkungen auf ein Unternehmen. Die Energie- und Materialkosten lassen sich deutlich senken. Abhängigkeit von Volatilitäten können verkleinert oder durch einen adäquaten, umweltfreundlichen Ersatzstoff komplett eliminiert werden. Zusätzlich steigert sich die Akzeptanz bei den Stakeholdern, was eine langfristige Berechtigung am Markt produziert.

Die deutsche Energiewende basiert neben der Erzeugung von regenerativen Energien auf einer Reduktion im Ressourcenverbrauch (Abschnitt 2.2.2). Dies lässt sich durch effizientere Ressourcennutzung und eine deutliche Steigerung der Recyclingrate erreichen.

5.5 ENERGETISCHE RESSOURCENEFFIZIENZ

Ein Energieaudit (EN 16247) oder ein Energiemanagementsystem (EnMS) soll ein Unternehmen dabei unterstützen, den Energiebedarf festzustellen und durch regelmäßige Verbesserungen strukturiert zu reduzieren. Dabei wird die bereitgestellte Energie von der

²³ Vgl. Meadows, D. (1972)

Verteilung bis hin zum Verbraucher bilanziert. Dies ermöglicht eine Bewertung von Sektoren und die Zuordnung von Verbräuchen auf die produzierten Einheiten. Ein zugelassenes EnMS ist für stromintensive Betriebe die Voraussetzung zur Befreiung von der EEG-Umlage nach § 64 ff. EEG 2017. Ebenfalls ist es nach § 55 des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) und § 10 des Stromsteuergesetzes möglich, einen Spitzenausgleich zu erhalten. Ein weiterer Vorteil kann in der ökologischen Vorbildfunktion eines Unternehmens durch den Einsatz eines EnMS generiert werden.

„Energiemanagement ist die vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen.“ [22]

Die bekanntesten Energiemanagementsysteme auf dem deutschen Markt sind die DIN EN ISO 50001 und das Energieaudit EN 16247. Beide basieren auf dem PDCA-Zyklus nach Deming (Abbildung 5-5). Dieser läuft in festgelegten Intervallen ab, in der Reihenfolge Plan, Do, Check und Act. Somit soll eine kontinuierliche Verbesserung des Energiebedarfs realisiert werden.

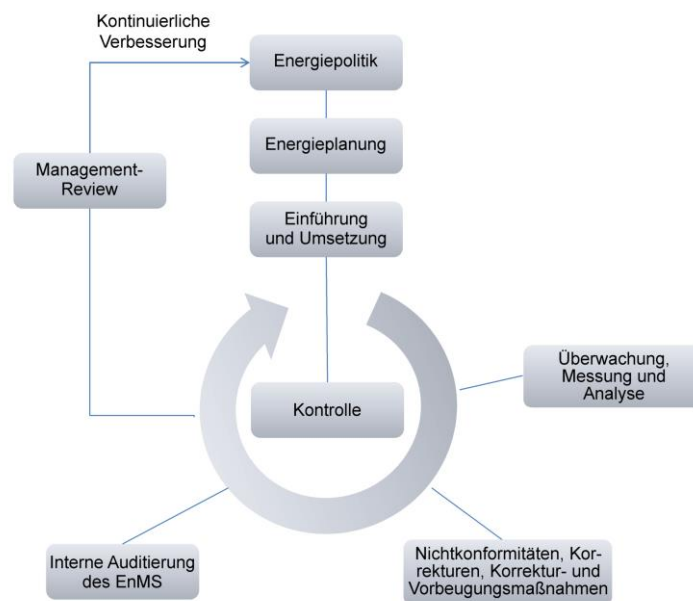


Abbildung 5-5: Modell Energiemanagementsystem [23]

Für die energetische Bewertung der einzelnen Verbräuche ist eine ausreichende Messtechnik unerlässlich, inkl. regelmäßiger Überwachung und Auswertung.²⁴

Ein deutlicher Nachteil der Verfahren liegt bereits in der ersten Zertifizierung der Unternehmen. Ein Unternehmen muss seinen aktuellen Energiebedarf präsentieren und anschließend für die Audits und die Rezertifizierung eine Verbesserung seiner Energiebilanz nachweisen. Somit hat ein Unternehmen, das einen sehr schlechten Energiehaushalt aufweist einen deutlich geringeren Aufwand zum nächsten Durchlauf des PDCA-Zyklus zu

²⁴ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4602 Blatt 1 (2007), S. 18

leisten als ein vergleichbares energiebewusstes Unternehmen. Folglich sind die monetären Aufwendungen für das ineffizientere System geringer als bei der effizienten Konkurrenz. Eine mögliche Verbesserung könnte durch das Verfahren des PhO zweifellos integriert werden. Einem ineffizienteren Unternehmen sollten höhere Anstrengungen auferlegt werden als einem hocheffizienten Unternehmen. Denkbar wäre das Festlegen von unterschiedlichen Effizienzsteigerungsstufen. Auch die Intervallhäufigkeit des PDCA-Zyklus könnte in Abhängigkeit der Ineffizienz gestaffelt werden. Letztlich ist aber festzuhalten, dass für kleine und mittelständische Unternehmen keine Verpflichtung für ein EnMS besteht.

5.6 ÖKOBILANZ/LCA (LIFE CYCLE ASSESSMENT)

Die Ökobilanz bewertet die Energie- und Stoffströme der Input- gegenüber der Outputseite und deklariert die potenziellen Umweltauswirkungen. Dabei beginnt die Bilanzierung bei der Rohstoffgewinnung und endet beim Recycling (cradle to grave). Die Ökobilanz bietet die Grundlage für die Weiterentwicklung von Gütern und Dienstleistungen unter ökologischen Gesichtspunkten. Sie dient als Informationsgrundlage bei Entscheidungsträgern über die relevanten Umwelteigenschaften und kann für eine höhere Akzeptanz bei den Stakeholdern sorgen. Grundlage für die Erstellung einer Ökobilanz sind die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN 14044. In der DIN ISO 14040 sind die vier Phasen zur Erstellung einer Ökobilanz ausgewiesen.

„Eine Ökobilanz-Studie umfasst vier Phasen:

- a) die Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen;*
- b) die Sachbilanz-Phase;*
- c) die Phase der Wirkungsabschätzung und*
- d) die Phase der Auswertung.“ [24]*

Da das Ziel und der Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz nicht festgelegt sind und frei in der ersten Phase der Ökobilanz gewählt werden können, ergibt sich eine gewisse Unschärfe in der Vergleichbarkeit. Ebenfalls schreibt die Ökobilanz nicht die Art der Bewertungssysteme vor und überlässt dem Nutzer die Auswahl.

Die Lebenszyklusanalysen werden über mathematische Modelle abstrahiert. Lebenserwartungen, Einsatzzeiten, technisches Recyclingpotenzial basieren auf dem aktuellen Wissenstand und sind in der Regel als Mittelwerte berücksichtigt.²⁵

5.7 ÖKOLOGIEORIENTIERTE BEWERTUNGSSYSTEME

Für die Bilanzierung der ökologischen Effekte eines unternehmerischen Handelns stehen eine große Anzahl an Bewertungsverfahren zur Verfügung. Diese können von einem Unternehmen kombiniert werden und somit das ökologische Verbesserungspotenzial aufde-

²⁵ Vgl. Schebek, M., Kaltschmitt, L. (2015), S. 203

cken. Die in der Arbeit eingebundenen Bewertungssysteme werden im Folgenden vorgestellt. Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, dass es eine Reihe weiterer Verfahren gibt, z. B. Water Footprint (WF), Sustainable Process Index (SPI), Punkteschema, Schadschöpfungseinheiten, CML-Methode, ECO Indicator und viele mehr.

KEA (Kumulierter Energieaufwand)

Der Kumulierte Energieaufwand nach der VDI 4600 kann in einzelnen Lebensphasen oder über den gesamten Lebenszyklus den Primärenergiebedarf von Produkten oder Dienstleistungen auswerten und somit die Grundlage der Ökobilanz bilden. Berücksichtigt werden sowohl die energetisch genutzten als auch die indirekten Energieverbräuche. Unter den indirekten Energieverbräuchen fast man z. B. den Energieaufwand für die Beleuchtung am Produktionsort zusammen.

„Der KEA gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H), die Nutzung (KEA_N) und die Entsorgung (KEA_E) des ökonomischen Guts dar, wobei für diese Teilsummen anzugeben ist, welche Vor- und Nebestufen mit einbezogen sind.“ [25]

In Formeln ausgedrückt ergibt sich Gleichung (5-1):

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (5-1)$$

Angepasst an die Bezeichnungen dieser Arbeit lautet die Gleichung:

$$KEA = KEA_{Herst} + KEA_{Distr} + KEA_{Betr} + KEA_{Recyc} \quad (5-2)$$

CF (Carbon Footprint) oder auch PCF (Product Carbon Footprint)

Der Carbon Footprint soll die einfache Erfassung der Auswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung über die kompletten Lebensphasen (cradle to grave) ermöglichen. Das Ergebnis beschreibt die Summe an emittierten Treibhausgasen nach der Lebenszyklusanalyse analog zum Verfahren des kumulierten Energieaufwandes. Das Verfahren des Carbon Footprints basiert auf der Ökobilanz, außer dass nur die treibhausgasrelevanten Emissionen berücksichtigt werden. Zu den wichtigsten (d.h. schädlichsten) Treibhausgasen zählen Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) sowie diverse Fluor- (chlor-)kohlenwasserstoffe. Zusammengefasst werden sie über Gewichtungsfaktoren zu CO_2 -äquivalenten Emissionen. Der CF macht keinen Unterschied zwischen biogenen und fossilen CO_2 -äquivalenten Emissionen, was in der Wissenschaft kontrovers diskutiert wird.²⁶ Biogene Treibhausgase resultieren aus der Verbrennung natürlicher Energieträger wie Holz. Das ausgestoßene CO_2 wird während der Lebensphase des Baumes aus der Atmosphäre gebunden. Dies kann für eine Klimaneutralität beim Recycling sorgen. Auch die Verwen-

²⁶ Vgl. Schebek, M., Kaltschmitt, L. (2015), S. 234

dung von Biogas – das größtenteils aus Methan besteht – ist klimaneutral, sofern das biogene Methan verbrannt wird. Entweicht das Methan in die Umwelt, ist die Wirkung des Methans deutlich treibhaussteigernder als die Bindung während der Lebens- und Wachstumsphase. Dies liegt am hohen Treibhauspotenzial von Methan.

Der CF kann auf Ebene einzelner Länder, Regionen, Kommunen, Unternehmen, Privatpersonen, Produkte und Dienstleistungen erstellt und somit flexibel angewendet werden. Die Kennzahl aus der Analyse macht ihn sehr gut vergleichbar. Auch hier muss für eine Vergleichbarkeit auf identische Bilanzgrenzen geachtet werden.

$$CF = CF_{Herst} + CF_{Distr} + CF_{Betr} + CF_{Recyc} \quad (5-3)$$

Der CF beschreibt die klimarelevanten Auswirkungen im Einklang mit dem Umweltaufwand, der durch das Produkt oder der Dienstleistung aufgewendet wird, und ist somit ein wichtiges Werkzeug, um den Treibhauseffekt zu bekämpfen. Der CF darf jedoch nicht als das alleinige Werkzeug für die Umweltbewertung eingesetzt werden. Sind andere Umweltauswirkungen (z. B. Versauerung) des Produktes oder der Dienstleistung gravierender, dann kann es durch eine reine Betrachtung des CF zu Fehlinterpretationen kommen.

6 WECHSELWIRKUNGEN VON ÖKONOMIE UND ÖKOLOGIE

Für die Entwicklung eines Wechselwirkungsanalysetools zwischen dem ökonomischen und ökologischen Optimum ist es von besonderer Bedeutung, die korrelierenden und kohärenten Einflüsse zu kennen. Als erstes wird ein Zeitstrahl für die jeweiligen Betrachtungen angelegt (Abbildung 6-1). Deutlich ist zu erkennen, dass sich die Lebenszykluskostenperioden mit der Analyse des Carbon Footprint decken. Die Effizienzanalyse hingegen beschreibt nur den Verbrauch im Betrieb und trifft so auf die reine Betriebskostenbetrachtung. Die einzelnen Lebenszyklusphasen auf der Abszisse sind qualitativ zu verstehen und geben keinen quantitativen Wert an.

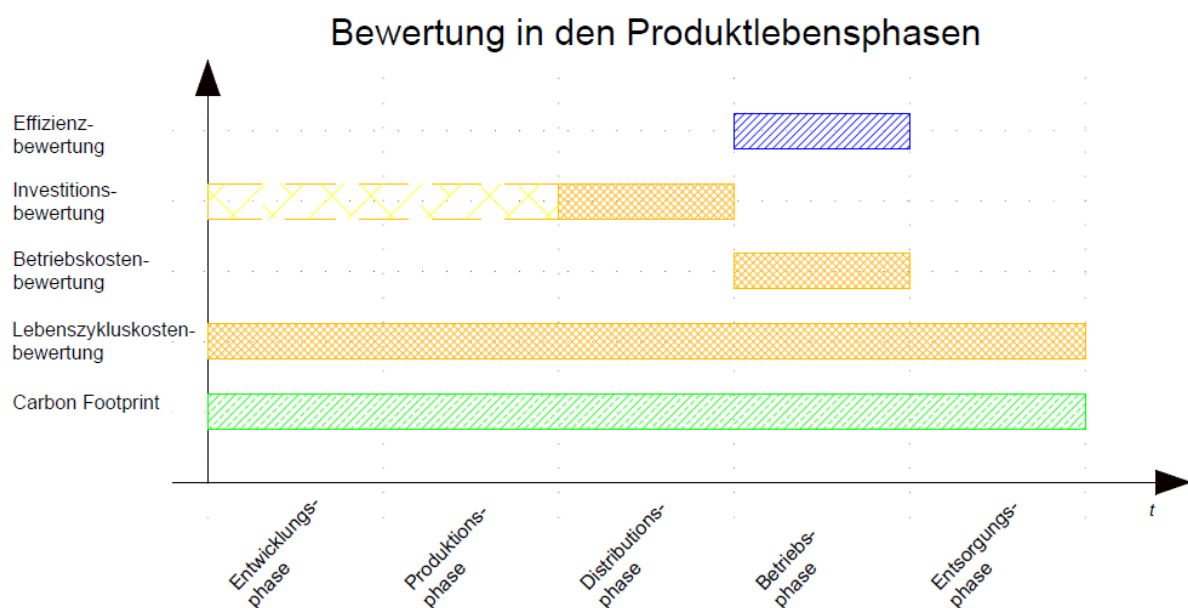


Abbildung 6-1: Bewertung der Produktlebensphasen

Während der Betriebsphase kann eine Bewertung über die Effizienz, die Lebenszykluskosten als auch den Carbon Footprint realisiert werden. Dies ist elementar durch den übermäßigen zeitlichen Einfluss der Betriebsphase. Durch Effizienzsteigerungen können Energie- und Materialbedarf reduziert werden, was Kosteneinsparungen und geringere Treibhausgasemissionen zur Folge hat. Zusätzlich sorgt eine höhere Effizienz für eine längere wirtschaftliche, evtl. auch gesetzliche Nutzungsdauer.

Nachteilig wirkt sich die Effizienzsteigerung auf die vor- oder nachgelagerten Lebenszyklusphasen aus. Auf der ökonomischen Seite können die Kosten z. B. durch eine aufwendigere Entwicklung, höheren Materialeinsatz, effektivere Technologie, höhere Distributionsaufwendungen durch einen größeren Volumen- oder Masseneinsatz ansteigen. Diese Faktoren werden indirekt über die Investitionskosten eingebunden. Eine aufwendigere Entsorgung kann zusätzlich am Lebensende zu höheren monetären Verpflichtungen führen.

Analog dazu ist die Entwicklung beim Carbon Footprint zu betrachten. Höhere Aufwendungen in den einzelnen Lebensphasen sorgen direkt oder indirekt unweigerlich zu höheren Treibhausgasemissionen.

Die Betrachtung des Barwertes verhält sich ebenfalls konträr zu einer Betriebseffizienzsteigerung. Die Erstinvestitionskosten werden im Gegensatz zu den Betriebskosten nicht abgezinst und haben somit einen größeren Einfluss auf die Entscheidung.

7 DAS PHYSIKALISCHE OPTIMUM (PHO)

7.1 DEFINITION UND BEISPIELE

Die Dissertation von Dirk Volta hat die Vorteile einer Analyse über das Physikalische Optimum klar aufgedeckt. Durch das Verfahren werden Prozesse nicht mehr auf imaginäre Bestwerte (z. B. A+++ bei Elektrogeräten), sondern klar auf physikalische Grenzen bezogen. Somit ist sichergestellt, dass es bei geltenden physikalischen Gesetzen keine Unterschreitung dieser Grenze gibt.

Definition des Physikalischen Optimums nach Volta (2014):

„Das in dieser Arbeit definierte Physikalische Optimum PhO ist ein theoretisch optimaler Referenzprozess. Zur Beschreibung des Physikalischen Optimums werden weitere Naturwissenschaften, wie die Biologie und die Chemie, herangezogen. Die Physik nimmt nach BAUMANN [26] in Anspruch, die Gesetzmäßigkeiten der Naturwissenschaften Chemie und Biologie mit abzudecken. Effekte der Biologie und Chemie, welche für einen systematischen Ansatz in der Produktionstechnik abgeleitet werden können, sind physikalisch beschreibbar.“[1]

Volta hat deutlich herausgestellt, dass Prozesse nur optimiert werden können, wenn das tatsächliche Optimum auch bekannt ist. Andernfalls kann es sich lediglich um Verbesserungen handeln. Leider kommt eine Analyse mit einem unzureichenden Optimierungsniveau häufig vor. Gerade Bewertungsverfahren, die ausschließlich eine prozentuale Verbesserung vorsehen, ohne genaue Maxima zu kennen, sind häufig unzureichend oder gar schlicht unmöglich, da physikalische Grenzen nicht überwunden werden können.²⁷

Mathematisch besteht das Physikalische Optimum aus der physikalischen Wirkarbeit ohne jegliche Verlustarbeit:

$$V_{PhO} = V_{Wirkarbeit} \quad (7-1)$$

Thermodynamisch kann es sich um einen reversiblen Prozess handeln, der somit die Möglichkeit impliziert, dass er in beide Prozessrichtungen ablaufen kann. Durch den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist ein solches System jedoch nicht realisierbar. Grund ist die Entropie, die bei jedem Vorgang zunimmt und einen reversiblen Prozess unmöglich macht:

$$V_{sys} = V_{PhO} + V_{verl} \quad (7-2)$$

Diese Aussage impliziert bereits, dass der reale Verbrauch immer höher sein muss als der physikalisch optimale.

²⁷ Vgl. Volta, D. (2014), 1

Der PhO-Faktor beschreibt diesen Zusammenhang und zeigt einen „Abstand“ zum physikalischen Optimum:

$$F_{PhO_{sys}} = \frac{V_{sys}}{V_{PhO}} \quad (7-3)$$

Aufgeschlüsselt kann die Gleichung auch geschrieben werden als:

$$F_{PhO_{sys}} = \frac{V_{PhO} + V_{verl_{sys}}}{V_{PhO}}$$

$$F_{PhO_{sys}} = 1 + \frac{V_{verl_{sys}}}{V_{PhO}}$$

Als Voraussetzung für eine korrekte Bilanzierung ist es unerlässlich, die Systemgrenzen eindeutig zu beschreiben.

Volta weist darauf hin, dass in seiner Ausarbeitung zwar von einem Verbrauch gesprochen wird, es sich aber in vielen Fällen um einen Bedarf handelt. Das physikalische Optimum beschreibt einen Bedarf an Material oder Energie. Dabei ist es möglich, nicht nur den vergangenen Verbrauch zu analysieren, sondern auch die aktuellen Leistungswerte über das physikalische Optimum zu prüfen. Somit können Ineffizienzen im dynamischen Verhalten und in der Betriebsweise eines Systems lokalisiert werden. Gerade bei der Betriebsweise kann nicht vorausgesetzt werden, dass ein ausgelegtes System auch immer in seinem Auslegungspunkt arbeitet.

Der **Leistungsbedarf** wird von Volta (2014) mathematisch wie folgt beschrieben:

$$f_{PhO_{sys}} = \frac{\dot{V}_{sys}}{\dot{V}_{PhO}} \quad (7-4)$$

Volta unterscheidet zwischen internen und externen Kopplungsprozessen.

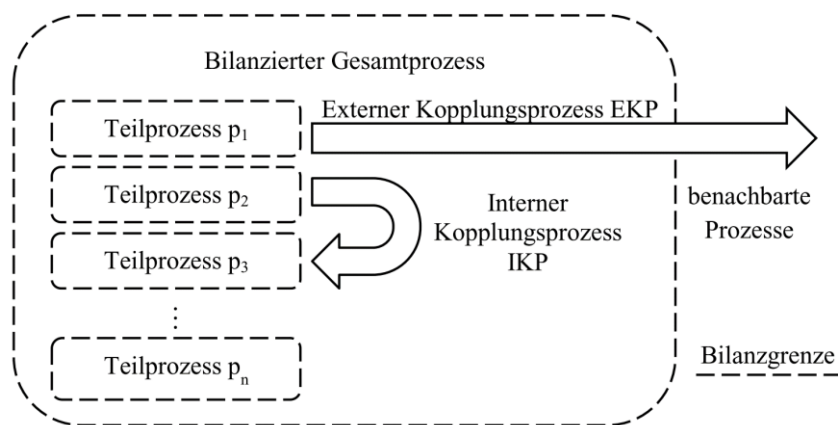


Abbildung 7-1: Kopplungsprozessbewertung PhO [1]

Mathematisch werden die Kopplungsprodukte als Summe der einzelnen Prozessschritte beschrieben, abzüglich der internen und externen Kopplungsprozesse:

$$V_{PhO} = \sum_{p=1}^n \{V_{PhO,p}\} - V_{IKP} - V_{EKP} \quad (7-5)$$

$$V_{PhO} = V_{PhO,p1} + V_{PhO,p2} + \dots + V_{PhO,n} - V_{IKP} - V_{EKP}$$

Den Prozesswirkungsgrad definiert er als Produkt aus seinen Einzelwirkungsgraden:

$$V_{PhO,p} = V_p \cdot \prod_{i=1}^n (\eta_i) \quad (7-6)$$

Um verschiedene Energieträger vergleichbar zu machen, empfiehlt Volta einen Bezug auf den Primärenergiegehalt des jeweiligen Energieträgers. Sollten jedoch unterschiedliche Medien im Prozess integriert sein, muss die Analyse für jedes Medium separat durchgeführt werden.

Eine weitere Entwicklung Voltas ist das Diagramm zur Ableitung der Handlungsmotivation von Unternehmen um Optimierungen durchzuführen.

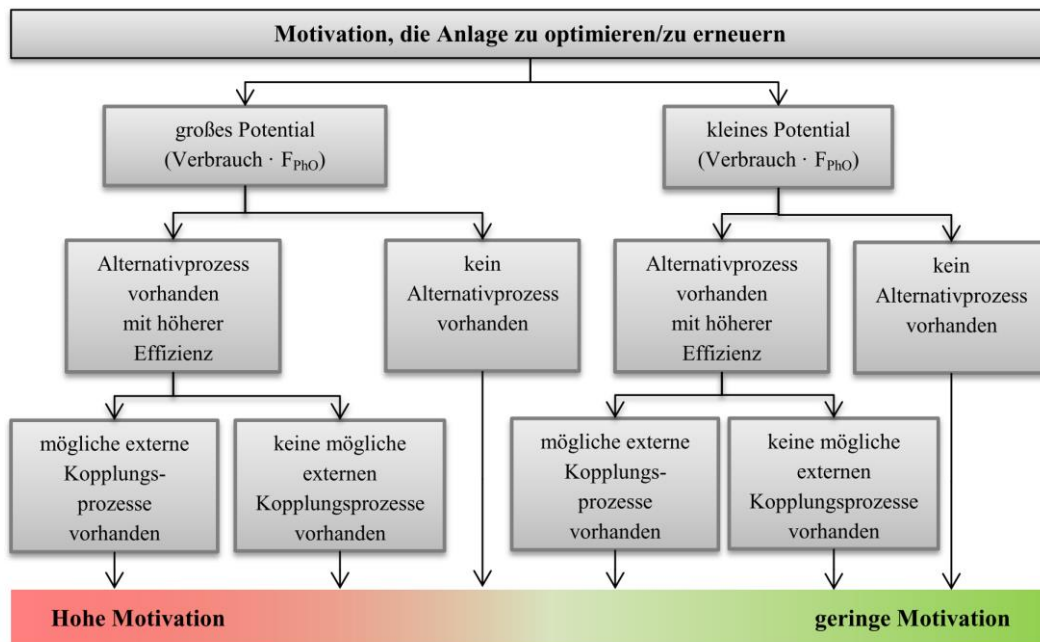


Abbildung 7-2: Handlungsmotivation [1]

Volta definiert in seiner Arbeit eine Potenzialanalyse, die als Produkt aus dem tatsächlichen Verbrauch und dem PhO-Faktor besteht. Somit erzeugen energie- oder materialintensive Prozesse einen größeren Handlungsbedarf als kleinere Prozesse. Sollte nun auch noch der PhO-Faktor relativ groß sein, steigt die Motivation für eine Handlung weiter an.

$$\text{Potential} = V \cdot F_{PhO} \quad (7-7)$$

Keichel (2017) hat in seiner Arbeit die Methode des Physikalischen Optimums aufgegriffen und durch zwei unterschiedliche Ansichten auf den Prozess erweitert. Er unterscheidet zwischen der Verbrauchs- und der Bedarfsperspektive. Volta hatte darauf hingewiesen, dass der Begriff Verbrauch eigentlich für den Bedarf steht. Das wiederum würde aber für eine Veränderung der Gleichung nach Keichel sorgen.

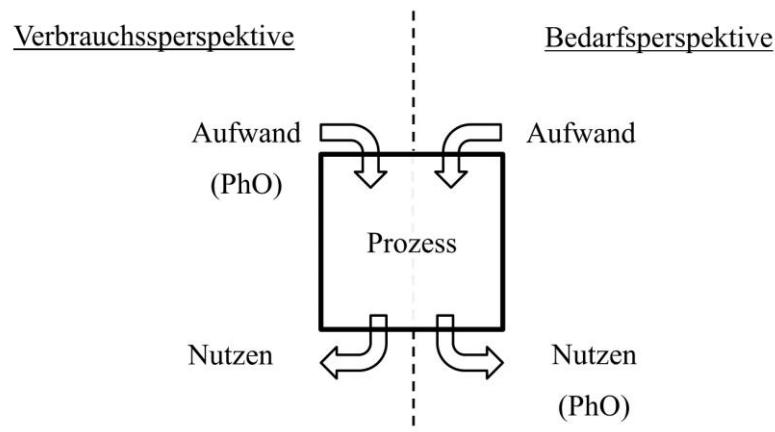


Abbildung 7-3: Verbrauchs- und Bedarfsperspektive [27]

Die Verbrauchsperspektive betrachtet bei einem festgelegten Energie- oder Materialeingang den Nutzen auf der Ausgangsseite. Bei einem physikalisch optimalen Prozess müsste der Nutzen dem Prozesseingang entsprechen.

$$F_{PhO}^V = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand (PhO)}} = \frac{V}{V_{PhO}} \leq 1 \quad (7-8)$$

Bei der Bedarfsanalyse steht der Nutzen als Bedarf fest, und es wird untersucht, welcher Aufwand auf der Prozesseingangsseite getätigt werden muss. Auch hier wäre der Aufwand gleich dem Nutzen, wenn es sich um ein physikalisch optimales System handelt:

$$F_{PhO}^B = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen (PhO)}} = \frac{B}{B_{PhO}} \geq 1 \quad (7-9)$$

Eine weitere Entwicklung in der Arbeit von Keichel ist die Erweiterung der Methode auf grenzwertbezogene Kennzahlen, was die Methode deutlich universeller in der Anwendung macht. Die ursprüngliche Anwendung basierte auf physikalischen Grenzwerten, die z. B. aus thermodynamischer Sicht nicht überschritten werden können. Als Beispiel dient ein herkömmliches Photovoltaikmodul, das horizontal zum Sonnenazimut ausgerichtet ist. Die Energiesumme der solaren Einstrahlung, bestehend aus der direkten, diffusen und reflektierten Sonneneinstrahlung, wird beispielhaft mit 800 W/m^2 beziffert. Physikalisch ist in diesem einfachen Beispiel die maximale elektrische Leistung ebenfalls mit 800 W/m^2 als Grenzwert zu bestimmen. In der Realität weichen die heutigen Solarzellen aufgrund von Verlusten, z. B. Reflexionen, Übergangswiderstände zwischen den Siliziumkristallen, Leitungsverluste, Konverterverluste usw. von diesem physikalischen Optimum ab:

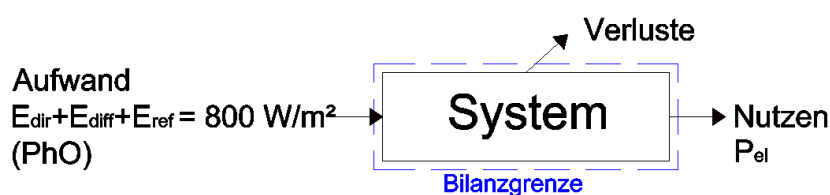


Abbildung 7-4: Bilanzsystem Photovoltaikmodul

$$f_{PhO}^V = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand (PhO)}} = \frac{P_{el}}{E_{dir} + E_{diff} + E_{ref}}$$

Was aber passiert, wenn der Grenzwert durch eine externe Quelle festgelegt wird? Dann gibt es keine physikalische Erklärung, dass dieser Wert das PhO angeben würde. Eine denkbare externe Quelle könnte ein Gesetzestext, eine Richtlinie, eine Verordnung, eine Rezeptur oder einfach ein Bedarfswert sein. Auch hier soll ein kurzes Beispiel die Thematik verdeutlichen.

Die DIN V 18599 schreibt die Beleuchtungsstärke in einem Hörsaal oder Auditorium auf einer Nutzhöhe von 0,75 m für sitzende Tätigkeiten und 0,85 m für stehende Tätigkeiten mit $500 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$ als Wartungswert vor.²⁸ Der Wartungswert ist die mindeste, gemittelte Beleuchtungsstärke, bevor eine Wartung der Beleuchtungsanlage stattfinden muss.²⁹ Dieser Wert ist physikalisch kein Grenzwert, die Beleuchtungsstärke könnte deutlich gesteigert werden. Nach Keichels Definition der grenzwertorientierten Betrachtung kann dieser vorgegebene Wert als Grenzwert für das PhO festgelegt werden.³⁰ Somit liegt das PhO auf der Nutzenseite, und es handelt sich um einen Bedarfsprozess (Abbildung 7-5).

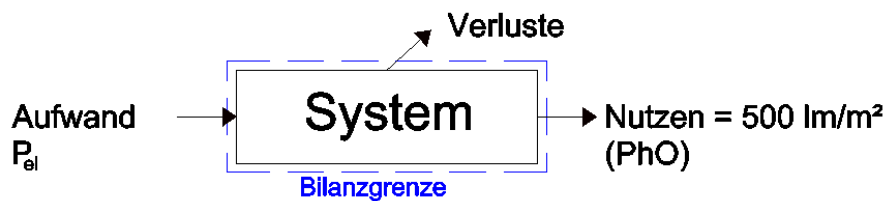


Abbildung 7-5: Bilanzsystem für eine Lichtquelle

In dem Fall würde die Leistung über die Gleichung (7-9) bestimmt werden:

$$f_{PhO}^B = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen (PhO)}} = \frac{P_{el}}{500 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \cdot 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}}$$

Die Herleitung der Nutzengleichung resultiert aus der Energieübertragung von Licht bei einer Wellenlänge 555 nm. Eine detaillierte Betrachtung befindet sich im Anhang Kapitel V Abschnitt I.a.

7.2 OPTIMALE ANLAGENGESTALTUNG NACH DEM PHO

Die optimale Anlagenkonfiguration nach dem physikalischen Optimum basiert auf den Gleichungen aus Abschnitt 7.1. Die folgenden Optimierungsmethoden werden mit der Bedarfsperspektive nach Keichel ausgeführt. Im Sinne der Kurvendiskussion wird die Gleichung nach der Systemvariable ($SV = x$) abgeleitet. Die Systemvariable x muss den entscheidenden Faktor für die Verlustleistung darstellen. Als Beispiel sei hier die Isolierstärke s einer Anlagenisolierung diskutiert.

²⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN V 18599-10* (2016), S. 20

²⁹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN V 18599-4* (2016), S. 13

³⁰ Vgl. Keichel, C. (2017), S. 7-8f.

Eine zweite Isoliervariable basierend auf dem Wärmeleitwert könnte ebenfalls für eine Analyse angewendet werden. Dieser Wert ist jedoch aus technischer Sicht nicht einfach beliebig zu verringern. Eine Auswahl der vorhandenen Isolierstoffe muss in einer Voranalyse durchgeführt werden (siehe Kapitel 12).

Die Isolierstärke s hingegen kann beliebig dimensioniert werden, aber auch hier ist ein physikalisches Optimum nicht ausgeschlossen:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{sys}^B(x) &= \dot{V}_{PhO}^B + \dot{V}_{verl}^B(x) \\ f(x) &= \dot{V}_{PhO}^B + \dot{V}_{verl}^B(x) \\ f'(x) &= [\dot{V}_{PhO}^B + \dot{V}_{verl}^B(x)] \frac{d}{dx}\end{aligned}$$

Der physikalisch optimale Verbrauch ist unabhängig von der Systemvariable x und fällt somit bei der Ableitung der Gleichung weg:

$$f'(x) = [\dot{V}_{verl}^B(x)] \frac{d}{dx}$$

Die Gleichung wird zu null gesetzt und anschließend nach der gesuchten Variable aufgelöst.

Der beste zu erreichende PhO-Faktor mit der optimalen Isolierung nach dem PhO ergibt die geringste Verlustleistung und somit den kleinsten zu erreichenden PhO-Faktor:

$$f_{PhO_{sys(s opt)}} = 1 + \frac{\dot{V}_{verl_{sys(s opt)}}^B}{\dot{V}_{PhO}^B}$$

Werden zwei unterschiedliche Systeme oder Konfigurationen miteinander verglichen, so kann dieses über die Differenz der beiden Faktoren durchgeführt werden.

PhO- Differenzfaktor:

$$\begin{aligned}\Delta F_{PhO} &= F_{PhO_{sys1}} - F_{PhO_{sys2}} \\ \Delta F_{PhO} &= \frac{V_{sys1}^B}{V_{PhO}^B} - \frac{V_{sys2}^B}{V_{PhO}^B} \\ \Delta F_{PhO} &= \frac{V_{sys1}^B - V_{sys2}^B}{V_{PhO}^B}\end{aligned}\tag{7-10}$$

PhO- Differenzleistungsfaktor:

$$\begin{aligned}\Delta f_{PhO} &= f_{PhO_{sys1}} - f_{PhO_{sys2}} \\ \Delta f_{PhO} &= \frac{\dot{V}_{sys1}^B - \dot{V}_{sys2}^B}{\dot{V}_{PhO}^B}\end{aligned}\tag{7-11}$$

8 DAS BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE OPTIMUM (BWO)

8.1 ANALYSE ÜBER DIE KAPITALWERTMETHODE

Das Betriebswirtschaftliche Optimum soll eine maximale Ökonomie beschreiben. Dabei ist auf eine Analysetreue bei der Bewertung der verschiedenen Systeme zu achten. Dazu müssen die Einflussparameter ebenso wie das Bewertungsverfahren über die komplette Analyse hin konstant gehalten werden. Das Betriebswirtschaftliche Optimum soll verschiedene Anlagenkonzeptionen nach dem Vorbild des Physikalischen Optimums gegenüberstellen und bewerten. Ziel der Analyse ist eine eindeutige Bewertung der Konzepte bezogen auf einen Grenzwert. Dabei wird das Betriebswirtschaftliche Optimum durch das System oder die Systemkonfiguration definiert, welches die beste ökonomische Bilanz aufweist.

Aktuelle betriebswirtschaftliche Bewertungen basieren auf einer dynamischen Kostenanalyse. Auch die VDI 2884 empfiehlt für eine aussagekräftige LCC-Analyse eine dynamische Investitionskostenanalyse. Daher sollen in den kommenden Analysen ebenfalls dynamische Effekte berücksichtigt werden. Sollten sich die dynamischen Effekte aber gegenseitig aufheben, z. B. bei der Betrachtung von Vorteilhaftigkeiten unterschiedlicher Systeme, dann können die Effekte vernachlässigt werden.

In den vorherigen Kapiteln wurden einige der dynamischen Bewertungsverfahren erläutert. Als eines der komplexesten Systeme mit größter Aussagekraft hat sich die Kapitalwertmethode herauskristallisiert. Sie bildet die Grundlage aller dynamischen Investitionsrechnungen.

Hier werden die Investitionskosten den laufenden zu erwartenden Betriebskosten und Betriebserlösen gegenübergestellt. Mitberücksichtigt sind die Verzinsungen des Investors und die voraussichtlichen Preissteigerungen der laufenden Betriebskosten in der Zukunft. Eine für die Analyse des BwO unerlässliche Unbekannte ist die Nutzungszeit. Eine Methode zur Nutzungszeitbestimmung ist die Analyse über die Kapitalwertmethode an sich. Solange der Kapitalwert eine positive Steigung aufweist, spricht aus wirtschaftlichen Gründen nichts gegen einen weiteren Betrieb der Anlage. Sollte die Steigung stagnieren oder negativ werden, ist die wirtschaftlich optimale Nutzungsdauer erreicht oder überschritten. Für die Berechnung der Nutzungsdauer über die Kapitalwertmethode sind zuordnungsfähige Erträge zwingend erforderlich. Werden jedoch einzelne Komponenten einer Anlage bilanziert, so sind keine Erträge direkt zuzuordnen. Hier gerät die Methode der Betriebslaufzeitermittlung über den Kapitalwert schnell an ihre Grenzen. Erfahrungswerte können eine übergeordnete Rolle bei der Bestimmung einnehmen.

$$\max_n C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} \right] + L_n \cdot (1+i)^{-t} \quad (8-1)$$

Wenn die wirtschaftliche Nutzungsdauer bestimmt wurde, lässt sich die Anlage mit einem betriebswirtschaftlichen Faktor vergleichen.

Die Formel für das Betriebswirtschaftliche Optimum würde dann folgendermaßen aussehen:

$$F_{BWO_{KWM}} = \frac{1}{\frac{C_o}{\max C_o}} = 1 \quad (8-2)$$

Das Betriebswirtschaftliche Optimum (BwO) resultiert aus dem maximalen Ertrag einer Kapitalwertanalyse zum Kapitalwert der unterschiedlichen Variationen eines Systems. Hierfür müssen die einzelnen Varianten bilanziert und gegenübergestellt werden.

In Abbildung 8-1 werden einzelne Kapitalwerte unterschiedlicher Konfigurationen grafisch gegenübergestellt. Trotz der unterschiedlichen Kapitalwertverläufe kann die optimale Betriebslaufzeit der Anlage eine hohe Singularität aufweisen. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der optimalen Nutzungsdauer um nicht wiederkehrende Investitionen handelt.

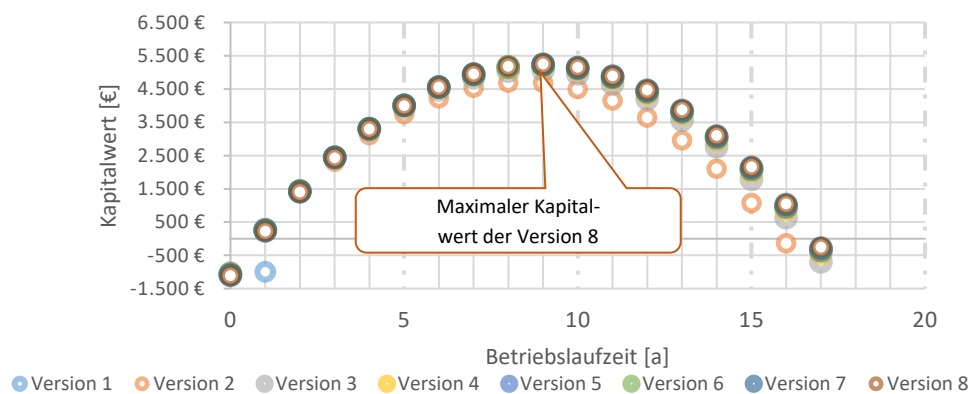


Abbildung 8-1: Kapitalwertanalyse verschiedener Anlagenkonfigurationen

In Abbildung 8-1 ist zu erkennen, dass die Anlagenversion 8 den besten Kapitalwert bei neun Jahren erreicht.

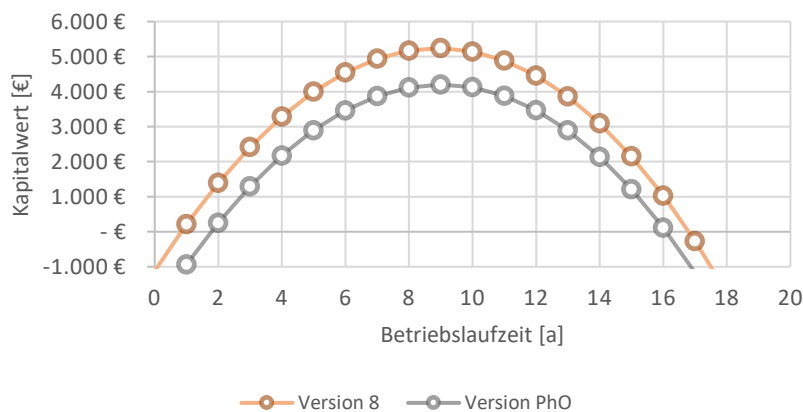


Abbildung 8-2: Vergleich PhO-System mit der Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertanalyse der Anlagenkonfiguration, ausgelegt nach dem Physikalischen Optimum, schneidet bei keiner Betriebsdauer positiver ab als die Anlagenvariante 8 und kann somit aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht priorisiert werden. Der BwO-Faktor gebildet aus Gleichung (8-2) zeigt die Verläufe der unterschiedlichen Konfigurationen im Verhältnis zum BwO über die Betriebslaufzeit.

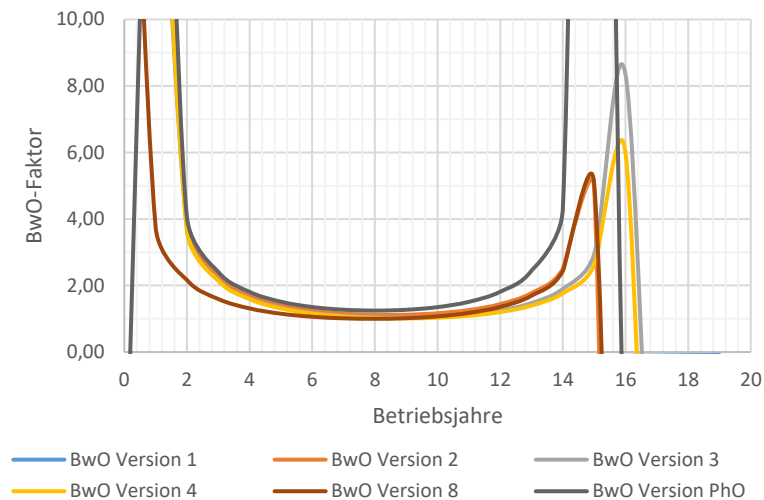


Abbildung 8-3: Resultierender BwO-Faktor über die Betriebslaufzeit

Abbildung 8-3 zeigt die einzelnen Verläufe der BwO-Faktoren in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Varianten. Deutlich ist die optimale Betriebslaufzeit der Anlagenvariante 8 zu erkennen. Die getroffenen Konzeptionen der einzelnen Versionen kommen erst ab einer Betriebslaufzeit von zwei Jahren in einen rentablen Bereich und verlassen die rentable Zone ab dem vierzehnten Betriebsjahr. Dieser Effekt lässt sich auf die gestiegenen Wartungs- und Reparaturkosten mit steigendem Anlagenalter zurückführen. Auch in dieser Betrachtung kommt die Version 8 dem Betriebswirtschaftlichen Optimum am nächsten.

8.2 EINFLUSS VON TEUERUNG UND VERZINSUNG

In den folgenden Grafiken sind die Randparameter gegenüber den vorherigen Abbildungen verändert: Wurden eben drei Prozent Teuerungsrate und fünf Prozent kalkulatorischer Zinssatz angesetzt, sind es nun vier Prozent Teuerung und zwei Prozent kalkulatorischer Zinssatz.

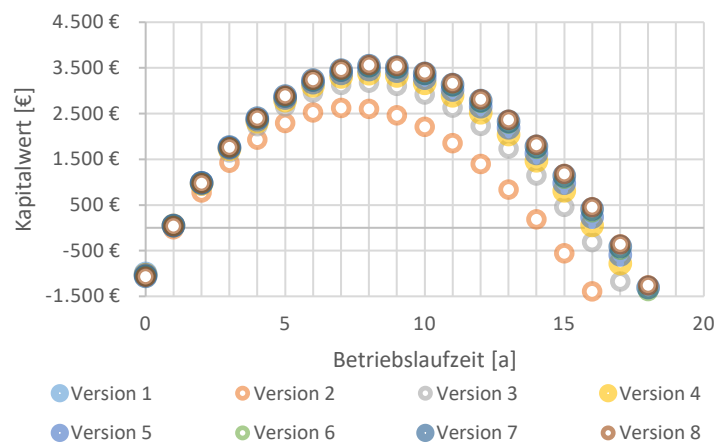


Abbildung 8-4: Kapitalwertanalyse unterschiedlicher Konfigurationen

Deutlich ist zu erkennen, dass die optimale Nutzungsdauer einer nichtwiederkehrenden Investition gesunken ist.

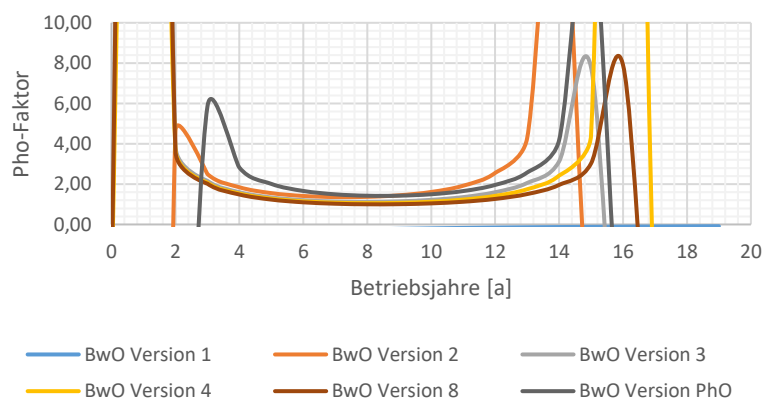


Abbildung 8-5: BwO-Faktor unterschiedlicher Konfigurationen

Positiv bei der Bewertung über die Kapitalwertmethode muss die Möglichkeit der optimalen Laufzeitanalyse aufgeführt werden, solange Erträge der zu bewertenden Anlage oder Komponenten zuzuordnen sind.

Die Komplexität der Berechnungen erfordert aber eine kritische Hinterfragung der Informationsdichte. Daher wird im folgenden Abschnitt eine vereinfachte Kapitalwertberechnung eingeführt. Diese richtet sich ebenfalls nach dem Prinzip des Barwertes und stellt eine dynamische Kostenrechnung dar.

8.3 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG (BWO)

Die Analyse beruht auf der Kapitalwertmethode aus dem vorherigen Abschnitt. Jedoch werden hier nur die relevanten Einflussgrößen der Aufwendungen betrachtet. Die Analyse soll einen dynamischen Ansatz haben und verschiedene Einflussgrößen, wie die Betriebslaufzeit und die zu erwartenden Preissteigerungen, berücksichtigen.

Für eine Vergleichbarkeit werden folgende Randbedingungen festgelegt:

Erste Randbedingung BwO:

Der Restwert der Systeme liegt auf gleichem Niveau.

Zweite Randbedingung BwO:

Die Erträge der Systeme sind identisch. Diese Annahme gründet sich auf die Leistungsbeschreibung des Lastenheftes. Hier wurde der Nutzen klar definiert, die Systeme haben also das gleiche Ziel. Dies ist unerlässlich für eine Vergleichbarkeit der Systeme als Bottom-up-Methode.

Mit den angegebenen Randbedingungen verändert sich Gleichung (3-18) wie folgendermaßen:

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} \right] + \cancel{L_n \cdot (1+TR)^{-t}}$$

$\nearrow = 0 \text{ (Randbedingung 2)}$
 $\searrow = 0 \text{ (Randbedingung 1)}$

Nur bezogen auf die Kosten des Systems ergibt sich folgende Gleichung:

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{-a_t}{(1+i)^t} \right]$$

Da es sich jetzt um einen reinen Kostenterm handelt und Kosten per Definition bereits eine negative Implementierung aufweisen, wird die Gleichung positiv definiert (Gleichung (8-3)). Natürlich würde der Geldstrom die Bilanzgrenze verlassen und somit negativ deklariert werden. Jedoch beschreibt der Begriff Kosten bereits den Aufwand (Verbrauch) materieller und immaterieller Art.

„1. Aufwand an Geld; 2. Die Gesamteinheit der Werte von Gütern und Dienstleistungen, die bei der Erstellung eines wirtschaftl. Gutes verbraucht werden.“ [11]

$$C_0 C = A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{a_t}{(1+i_{BW})^t} \right] \quad (8-3)$$

Es ist auf eine signifikante Veränderung in der Gleichung hinzuweisen. In der Kapitalwertberechnung geht es um den Nachweis eines positiven Kapitalwertes (Abschnitt 3.3.5 und 8.1). Die Verzinsung senkt den Überschuss, bestehend aus der Differenz von Einnahmen und Ausgaben, ab. Die neue Gleichungsdefinition reduziert die zukünftigen Kosten, was explizit der Definition des Barwertes (BW) entspricht. Sie senkt zukünftige Ausgaben ab. Eine ausführliche Erklärung befindet sich in Kapitel 3.

Die Operationskosten K_{OK} können nach der dynamischen Methode mit jährlichen Preissteigerungen versehen werden und ergeben anschließend die jährlichen Betriebskosten a_t . Die einzelnen Bestandteile der Operationskosten sind in Abbildung 8-6 dargestellt:

$$a_t = K_{PEK} \cdot (1 + TR_{PEK})^t + K_{RSK} \cdot (1 + TR_{RSK})^t + K_{BSK} \cdot (1 + TR_{BSK})^t + K_{RK} \cdot (1 + TR_{RK})^t + K_{WK} \cdot (1 + TR_{WK})^t \quad (8-4)$$

Sollten die Teuerungsraten in den einzelnen Kostenpositionen identisch sein, dann kann die Formel vereinfacht werden zu:

$$a_t = K_{OK} \cdot (1 + TR_{OK})^t \quad (8-5)$$

$$K_{OK} = K_{PEK} + K_{RSK} + K_{BSK} + K_{RK} + K_{WK} \quad (8-6)$$

$$C_0 C = A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{K_{OK} \cdot (1 + TR_{OK})^t}{(1 + i_{BW})^t} \right]$$



Abbildung 8-6: Bestandteile der Operationskosten

Die Betrachtung des Betriebswirtschaftliche Optimums hat sich aufgrund der Evaluierung und der Selektion der berücksichtigten Parameter verändert. Jetzt liegt das Optimum nicht mehr in der Maximierung des Kapitalwertes, sondern ausschließlich in der Minimierung der Betriebs- und Investitionskosten.

Die mathematische Beschreibung für das Betriebswirtschaftliche Optimum aus dieser Betrachtung ist in Gleichung (8-7) aufgeführt:

$$F_{BWO} = \frac{C_0 C}{C_0 C_{BWO}} \quad (8-7)$$

Der Faktorenverlauf für das BwO und PhO ist in Abbildung 8-7 dargestellt. Bei der Grafik handelt es sich um eine Isolationsanalyse für einen Wärmeübertrager. Deutlich sind die Differenzen der Faktorenverläufe zu erkennen. Während der BwO-Faktor seinen optimalen Wert bei einer vergleichsweise dünnen Isolierung erreicht, benötigt eine Annäherung an das PhO eine sehr starke Isolierung. Die Isolierung erreicht ihr Optimum nach dem PhO bei einem Wert von 1990 mm. Eine weitere Steigerung würde aufgrund der größeren Oberfläche keine weitere Optimierung hervorrufen.

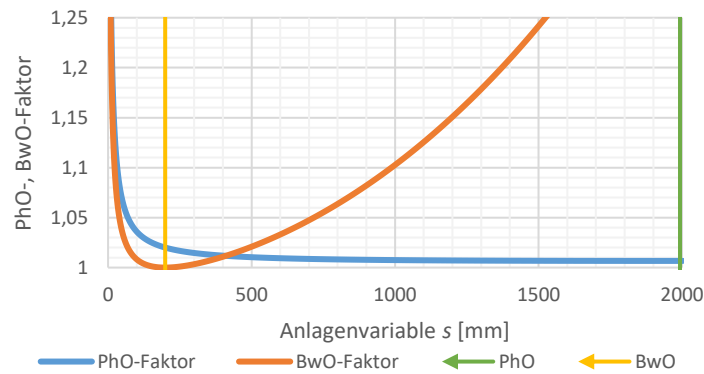


Abbildung 8-7: Vergleich Faktorenverläufe für das PhO und das BwO

8.4 OPTIMALE ANLAGENGESTALTUNG NACH DEM BWO

Bei der Analyse nach der optimalen Anlagengestaltung, basierend auf dem Betriebswirtschaftlichen Optimum, werden die Konfigurationen nach der Anlagengestaltung mit den geringsten Lebenszykluskosten bewertet. Für die Berechnung favorisiert man die dynamische Investitionskostenrechnung, die Dynamik wird mithilfe von Allokationswerten für die Teuerung und des Barwerts eingeführt. Die Allokationsfaktoren berechnen sich aus den in dieser Arbeit entwickelten Gleichungen (8-8) und (8-9). Zusätzlich können die Allokationsfaktoren grafisch den Abbildung 8-8 und Abbildung 8-9 entnommen werden.

Die Gleichung greift nur unter der Bedingung, dass alle Betriebskosten die gleiche Teuerung aufweisen (vgl. Abschnitt 8.3):

$$TZ_{Faktor} = \frac{((TR + 1)^n - 1) \cdot (TR + 1)}{(n \cdot TR)} \quad (8-8)$$

Abgeleitet ist die Gleichung aus dem dynamischen Anteil der Gleichung (8-4) für die Kostensteigerung. Abbildung 8-8 zeigt den Verlauf der Teuerung in Abhängigkeit von der Laufzeit.

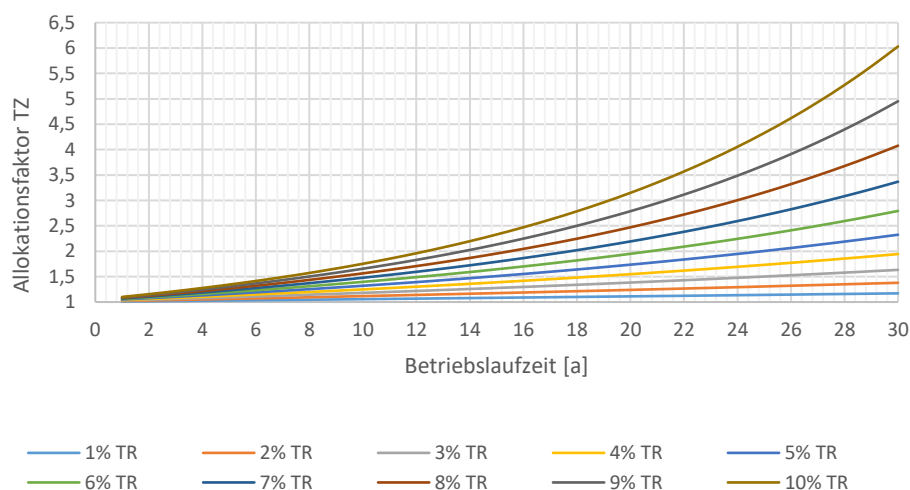


Abbildung 8-8: Verlauf der Teuerung in Abhängigkeit von der Laufzeit

Der Barwert geht unabhängig von den einzelnen Betriebskosten folgendermaßen in die Berechnung ein:

$$Z_{\text{Faktor}} = \frac{((i+1)^n - 1) \cdot (i+1)^{-n}}{i \cdot n} \quad (8-9)$$

Abbildung 8-9 zeigt den Verlauf des Barwerts in Abhängigkeit von der Laufzeit.

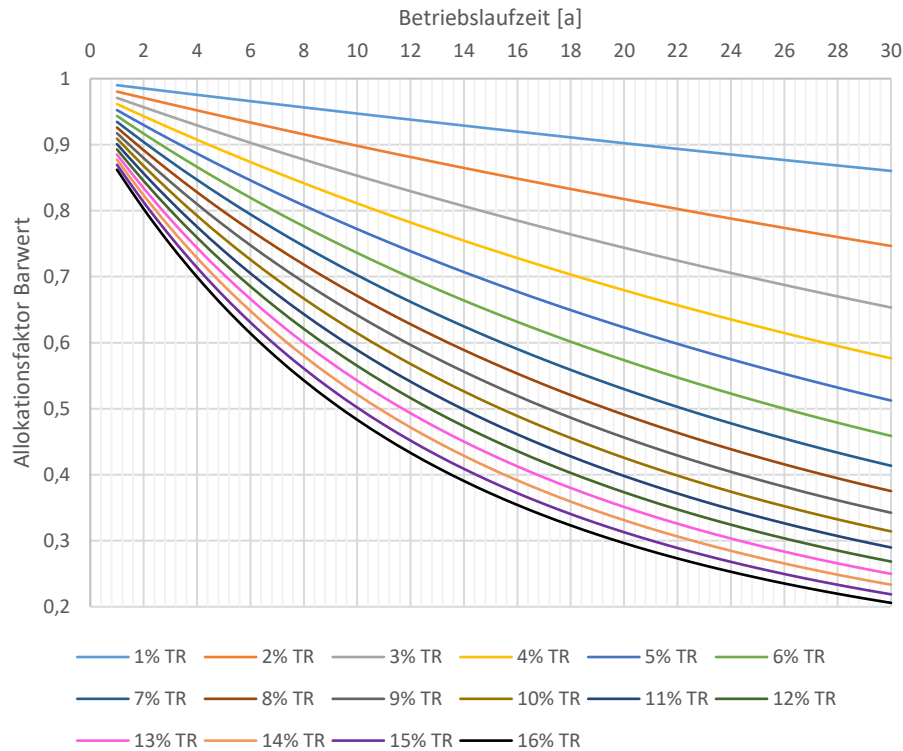


Abbildung 8-9: Verlauf des Barwerts in Abhängigkeit von der Laufzeit

Durch die Verwendung der Allokationsfaktoren für die Teuerung und Verzinsung (Barwert) in Abhängigkeit der Betriebslaufzeit vereinfacht sich Gleichung (8-3) aus Abschnitt 8.3 zu Gleichung (8-10):

$$C_0 C = A_0 + K_{OK} \cdot n \cdot TZ_{\text{Faktor}} \cdot Z_{\text{Faktor}} + K_{\text{Recyc}} \quad (8-10)$$

Hinzugefügt wurden die Kosten für das Recycling der Anlage. Für eine umfassende Betrachtung der Lebenszykluskosten werden die voraussichtlich entstehenden Kosten für die Verwertung mit eingebunden.

Anschließend wird die Gleichung für die Lebenszykluskosten nach der Anlagenvariable aufgegliedert. Hier muss zwingend dieselbe Variable aus der PhO-Analyse aufgegriffen werden. In dem Beispielfall wird wieder die Isolationsstärke s als Systemvariable x definiert:

$$C_0 C_{(x)} = A_{0(x)} + K_{OK(x)} \cdot n \cdot TZ_{\text{Faktor}} \cdot Z_{\text{Faktor}} + K_{\text{Recyc}(x)}$$

Weiterhin sollten die Operationskosten aufgeschlüsselt werden. Hierbei liegt der Fokus in der Abhängigkeit der einzelnen Kosten von der betrachteten Systemvariable. Für das Beispiel sind alle Betriebskosten, die eine Abhängigkeit von x haben, mit einem Index versehen:

$$C_0 C_{(x)} = A_0(x) + \{K_{PEK} + K_{RSK} + K_{BSK}(x) + K_{RK} + K_{WK}\} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc}(x)$$

Festzustellen ist ein Einfluss der Laufvariable x auf die Betriebsstoffkosten durch den Energieverbrauch der Anlage. Daraus folgt die Gleichung:

$$f_{(x)} = A_0(x) + \{K_{PEK} + K_{RSK} + K_{BSK}(x) + K_{RK} + K_{WK}\} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc}(x)$$

Bei der Ableitung fallen die Positionen heraus, die nicht abhängig von der Systemvariablen x sind. Folglich ergibt sich die Gleichung:

$$f'_{(x)} = [A_0(x) + \{K_{BSK}(x)\} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc}(x)] \frac{d}{dx}$$

Die abgeleitete Gleichung wird zu null gesetzt und nach der Variable x aufgelöst. Durch die Ableitung und die Untersuchung der Funktion werden die Extrempunkte mit einer Steigung von null ausgegeben. Es ist zu prüfen, ob es sich um ein lokales Minimum oder Maximum handelt. Zur Überprüfung eignet sich die Monotonietabelle, ein Beispiel befindet sich in Tabelle 19-10.

Die Systemvariable x gibt in diesem Fall den Konstruktionspunkt mit den geringsten Lebenszykluskosten wieder. An diesem Punkt wird der BwO-Faktor zu eins. Anschließend sollte der PhO-Faktor für den BwO-Zustand berechnet werden.

Bedingung für ein relatives Minimum $f(a)$ (Tiefpunkt der Funktion):

$$f(x) > f(a)$$

$$\text{für } x \neq a$$

9 DAS CARBON-FOOTPRINT-OPTIMUM (CFO)

Basierend auf den Gedanken aus Kapitel 5 ist die Nachhaltigkeit in Bezug auf die Umweltressourcen einzugliedern in eine umfassende Anlagenbewertung. Stellvertretend für die Endlichkeit der Ressourcen werden hier die äquivalenten Kohlendioxidemissionen bei der Anlagendimensionierung betrachtet. Es wird explizit auf die Gefahren einer einseitigen Umweltressourcenbetrachtung hingewiesen (vgl. Abschnitt 5.7). Das vorgestellte Verfahren ist auch mit anderen Ressourcen durchführbar.

Der Carbon Footprint setzt sich aus den Aufwendungen der einzelnen Lebensphasen zusammen:

$$CF_{sys} = CF_{Herst} + CF_{Distr} + CF_{Betr} + CF_{Recyc}$$

Die CO₂-äquivalenten Emissionen durch Herstellung, Distribution und Entsorgung bzw. Recycling können speziellen Datenbanken entnommen werden. Kritisch anzumerken ist, dass viele Datenbanken kostenpflichtig sind.

Der CFO-Faktor ist analog zu dem BwO-Faktor zu verstehen. Er beschreibt das Verhältnis zum minimalen CO₂-äquivalenten Zustand, der mit der Anlage unter den getroffenen Randbedingungen möglich ist:

$$CFO = CF_{min} \quad (9-1)$$

$$F_{CFO} = \frac{CF_{sys}}{CFO} \quad (9-2)$$

Die Analyse der aus Sicht der CO₂-äquivalenten Emissionen optimalen Anlagenkonfiguration erfolgt über die Ableitung nach der Systemvariablen x , die auch in der Betrachtung zum PhO- und BwO-Faktor dominierend war:

$$CF_{sys}(x) = CF_{Herst}(x) + CF_{Distr}(x) + CF_{Betr}(x) + CF_{Recyc}(x) \quad (9-3)$$

Bei den Betriebsvariablen könnten auch die restlichen Emissionsaufwendungen in die Berechnung eingebunden werden, z. B. Emissionsaufwendungen hervorgerufen durch die Wartungen oder Instandsetzungen. In der Regel ist die Aufwendung für die Energieversorgung jedoch der dominierende Faktor für die Analyse. Es wird dabei auf die Verwendung des Primärenergiefaktors und seine Entwicklung hingewiesen. Bei der Betrachtung von elektrischer Energie hat sich der Primärenergiefaktor in den vergangenen Jahren deutlich verändert. Diese Veränderung resultiert aus dem gestiegenen Anteil der eingespeisten erneuerbaren Energie in das Stromnetz.

Nachdem die Gleichung (9-3) nach der Systemvariablen abgeleitet wurde, wird die Gleichung zu null gesetzt. Anschließend wird nach der Laufvariable x aufgelöst. Es ergibt sich das Minimum der zu erreichenden CO₂-äquivalenten Emissionen über den kompletten Lebenszyklus. Sollte sich nun aber der Primärenergiefaktor und somit der CO₂-Emissionsfaktor verändern, so kann es zu einer Veränderung der Ergebnisse kommen. Eine Lö-

sung wäre durch eine Alternativrechnung mit einem vorgegriffenen Anlagenfaktor möglich, jedoch handelt es sich immer um einen Blick in die Zukunft, der mit Unsicherheiten behaftet ist.

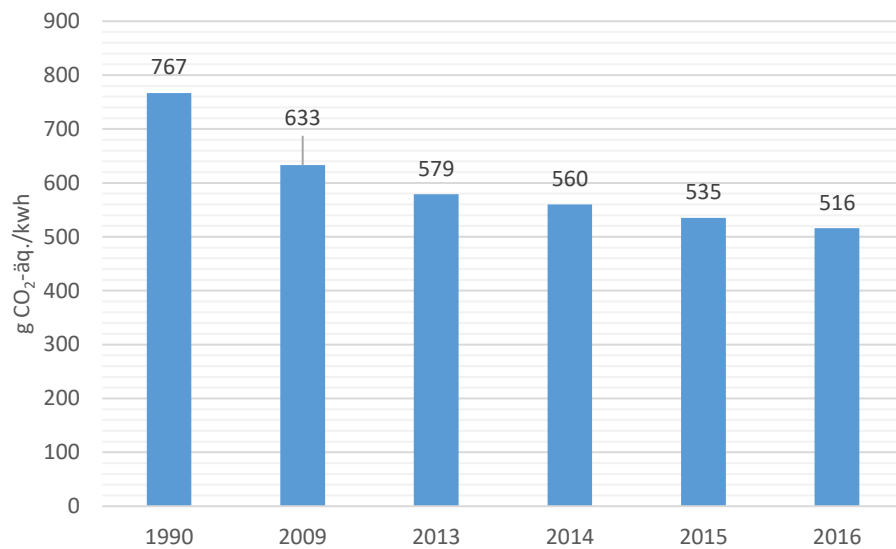


Abbildung 9-1: CO₂-Emissionsfaktor Strommix³¹, 2015 Hochrechnung [30], 2016 eigene Hochrechnung³²

³¹ Vgl. Petra Icha, Gunter Kuhs (2016), S. 5

³² Vgl. Graichen, P., et al. (2017), S. 4

10 WECHSELWIRKUNGSANALYSE PHO, BWO UND CFO

10.1 DAS VERFAHREN DER WECHSELWIRKUNGSANALYSE

Ein vereinfachter Lösungsansatz gegenüber den ausführlichen Einzelanalysen betrachtet nur die Punkte der jeweiligen Optima. Hierdurch wird eine umfassende Analyse über die Anlagenvariable vermieden und der Berechnungsaufwand erheblich verringert. Abbildung 10-1 zeigt den Verlauf der Analyse. Dabei verläuft die Reihenfolge numerisch im Uhrzeigersinn.

Unterschieden wird in der Art der Simulation. Entweder wird über eine Systemvariable (SV) analysiert, oder es werden unterschiedliche Technologien miteinander verglichen. Das Analyseverfahren aus Abbildung 10-1 kann angewendet werden, wenn es eine Systemvariable gibt, die einen Einfluss auf die physikalische Effizienz und auf die ökonomische Bilanzierung aufweist. Als Beispiel sei hier auf die Isolierstärke s einer Anlagenisolierung hingewiesen.

Sollen hingegen unterschiedliche Anlagensysteme miteinander verglichen werden, dann kann dies über die Technologieanalyse aus Kapitel 12 durchgeführt werden.

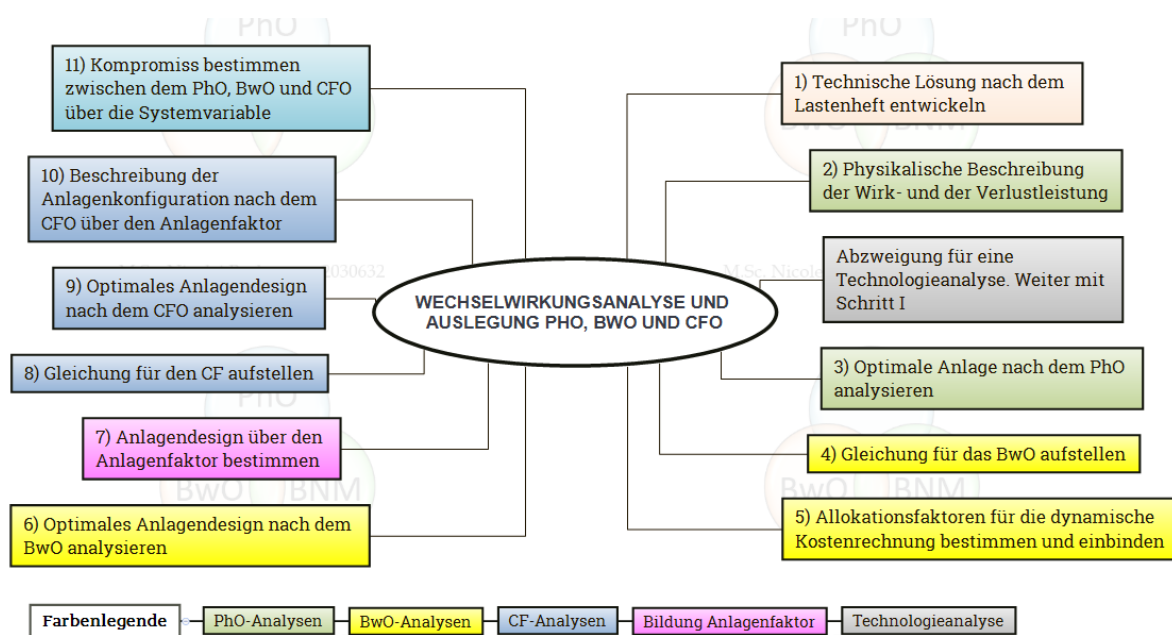


Abbildung 10-1: Ablauf Anlagendimensionierung PhO, BwO und CFO

10.1 ANLAGENFAKTOR ALS WECHSELWIRKUNGSBESCHREIBUNG

Ziel der Anlagenkonfiguration soll es in einem ersten Schritt sein, die Anlagen mit einem optimalen Kompromiss zwischen dem Physikalischen Optimum und dem Betriebswirtschaftlichen Optimum zu gestalten. In herkömmlichen Analyseverfahren der

Betriebswirtschaft wurden lediglich die ökonomischen Aspekte einbezogen, die monetären Aufwände standen im Vordergrund. Anders verhält sich die Analyse mit dem PhO. Hier sind die technischen Aspekte aus physikalischer Sicht für ein Anlagenoptimum ausschlaggebend. Diese beiden Ansichten sollen nun über eine dritte Faktorisierung kombiniert werden und als Grundlage der Anlagendimensionierung dienen.

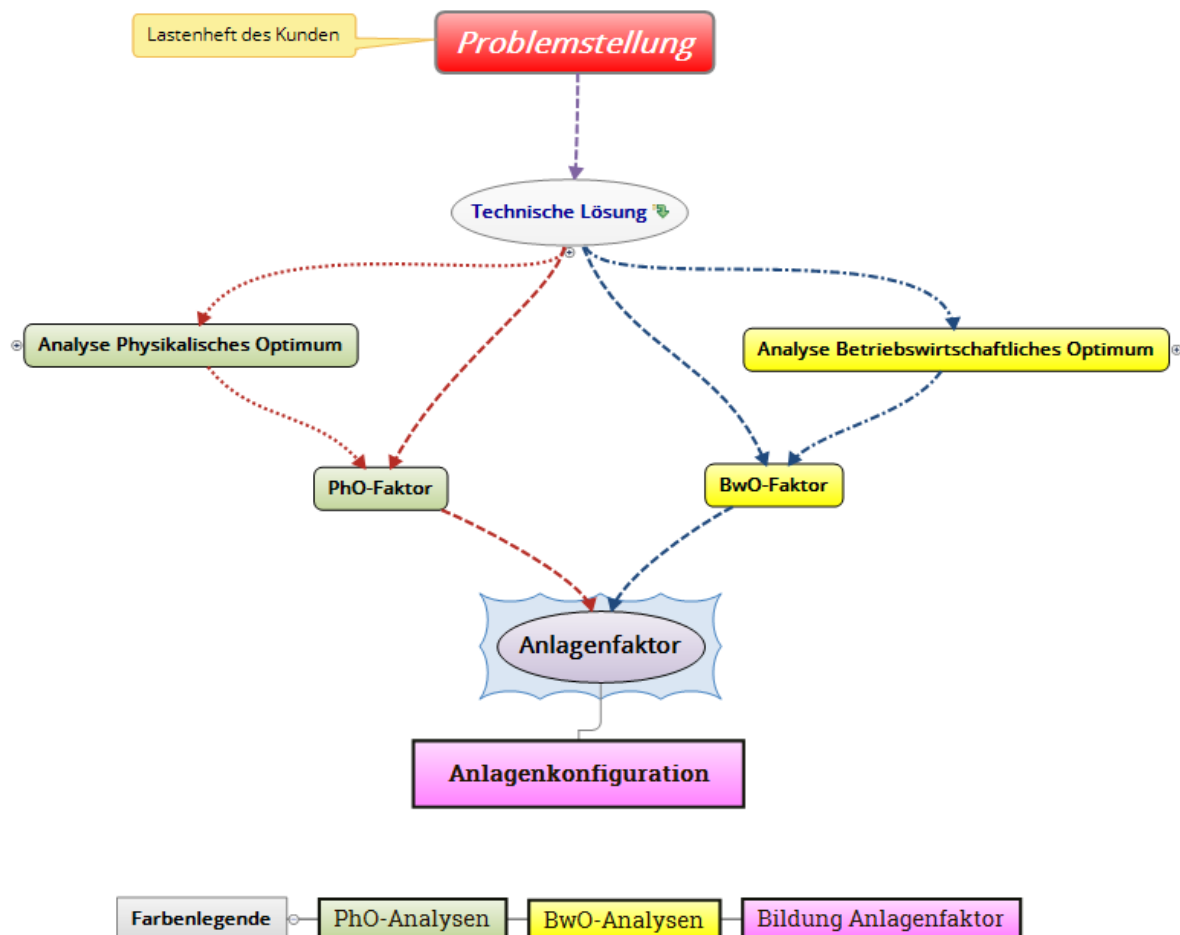


Abbildung 10-2: Anlagenfaktor zur Wechselwirkung von PhO und BwO

10.2 ANLAGENFAKTOR PHO-BWO

Die Zusammenführung wird über eine Gleichsetzung der beiden Faktoren erreicht (Gleichung (10-1)). Der PhO-Faktor bildet den Nenner:

$$F_{AN_{BwO-PhO_i}} = \frac{F_{BwO_i}}{F_{PhO_i}} \quad (10-1)$$

Der Anlagenfaktor beschreibt somit die Wechselwirkung zwischen dem PhO und dem BwO. Sollen beide Faktoren gleichgewichtet werden, dann erfolgt eine Anlagendimensionierung mit einem Anlagenfaktor von eins (siehe Abbildung 10-3). Dieser Wert ergibt den Schnittpunkt des PhO- und BwO-Faktors. Steigt der Anlagenfaktor an, geht die Anlagendimensionierung in Richtung des Physikalischen Optimums. Soll hingegen der betriebswirtschaftliche Aspekt überwiegen, dann sinkt der Anlagenfaktor unter eins ab. Das in dieser

Arbeit entwickelte Verfahren beschreibt somit eine identische Abweichung der beiden Betrachtungen von ihrem Optimum aus. Sollte es zwischen den beiden Optima keinen Schnittpunkt der beiden Graphen geben, dann verliert das Verfahren seine Gültigkeit (siehe Abschnitt 10.3).

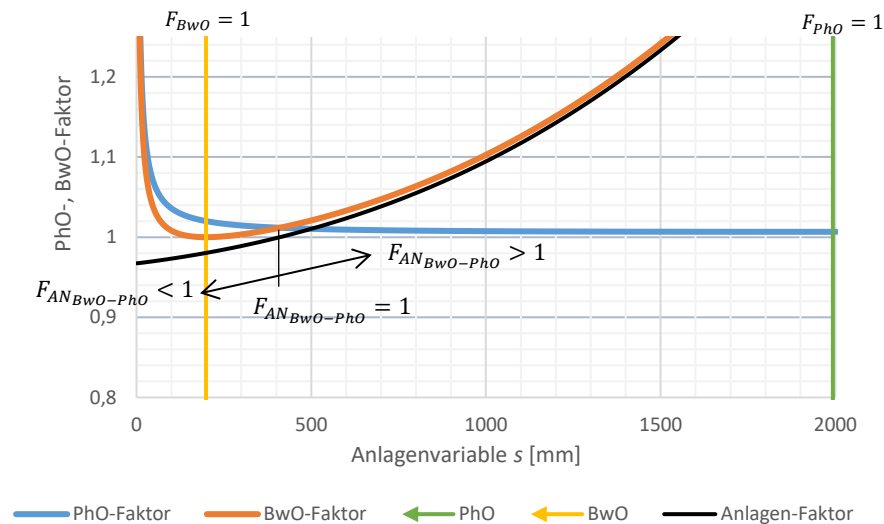


Abbildung 10-3: Verlauf des Anlagenfaktors

Abbildung 10-3 gibt einen Überblick über das Verhalten des Anlagenfaktors F_{AN} bei einer Anlagenkonzeption. Ist der Anlagenfaktor kleiner als eins, richtet sich der Schwerpunkt der Anlagenkonfiguration nach der ökonomischen Sicht. Dabei gilt die Differenz zu eins als Wertigkeit der Abweichung. Große Differenzen entsprechen einer deutlichen Abwendung zu einem „Extrem“ hin.

Sollte der Anlagenfaktor größer eins sein, ist die Anlage technisch optimiert hin zum physikalischen Optimum gestaltet worden. Ein absolutes Extrem mit einem Maximalwert lässt sich auf der Seite zum PhO hin nicht ausmachen.

$$F_{AN_{BwO-PhO_i}} = \frac{F_{BwO_i}}{F_{PhO_i}} = 1 \quad (10-2)$$

10.3 GRENZEN DES ANLAGENFAKTORS

In Ausnahmen kann sich eine Ausrichtung des Anlagenfaktors (Abschnitt 10.2) auf die vorgestellte Gleichwertigkeit kontraproduktiv auswirken. Ein Nachteil entsteht, wenn der Schnittpunkt der Graphen (BwO- und PhO-Faktor) außerhalb des Bereiches zwischen den jeweiligen Optima liegt (Abbildung 10-4). Bevor eine Gestaltung nach dem Anlagenfaktor durchgeführt wird, sollten die beiden Kontrollgleichungen ((10-3) und (10-4)) geprüft werden:

$$F_{PhO_{PhO}} \geq F_{BwO_{PhO}} \quad (10-3)$$

$$F_{BwO_{BwO}} \geq F_{PhO_{BwO}} \quad (10-4)$$

Lässt sich eine der beiden Gleichungen bestätigen, muss die Einsatzfähigkeit der Gleichung getestet werden. In dem grafischen Fall aus Abbildung 10-4 kann mit der Ersatzgleichung (10-5) der optimale Schnittpunkt für die Anlagengestaltung definiert werden.

In Worten bedeuten die Kontrollgleichungen:

Sollte der PhO-Faktor bei einer optimalen Anlagengestaltung nach dem PhO größer oder gleich dem BwO-Faktor sein, oder ist der BwO-Faktor bei der Anlagengestaltung nach dem BwO (Wert 1) größer als der PhO-Faktor an der genannten Stelle, dann kann der Anlagenfaktor nicht einfach zu eins gesetzt werden. Die zweite Ausnahmeregel kann unter normalen Umständen nur schwer erreicht werden. Entweder handelt es sich um eine energieerzeugende Anlage, oder der BwO-Faktor von eins kann nicht erreicht werden.

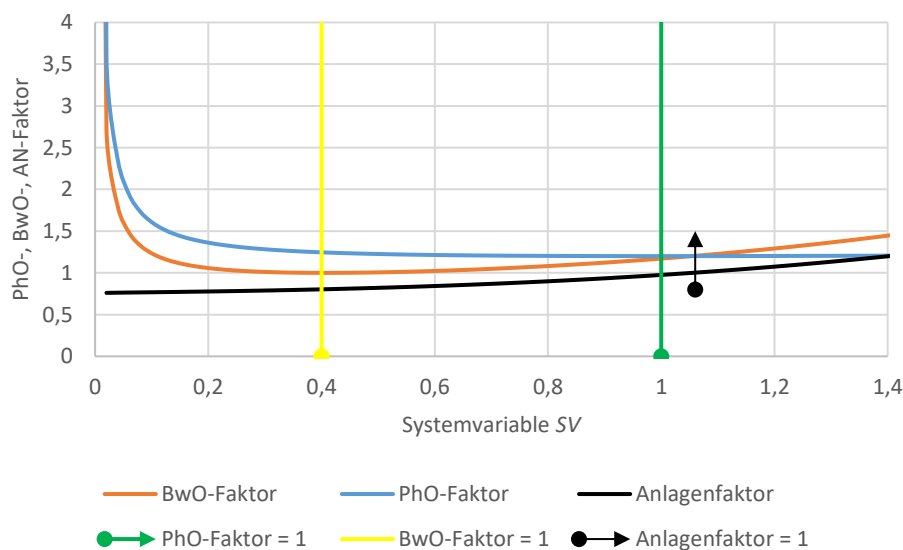


Abbildung 10-4: Verlauf Anlagenfaktor Zusatzbedingung

Der grafische Verlauf der Zusatzbedingung in Abbildung 10-4 beschreibt die Problematik. Der Anlagenfaktor von eins wäre außerhalb des Bereiches zwischen dem BwO- und dem PhO-Faktor. Somit kann in diesem Fall keine optimale Anlagengestaltung erreicht werden. Als Ansatz in einem solchen Fall ist eine Mittelwertbildung nach Gleichung (10-5) zu wählen.

$$F_{AN_{BwO-PhO\ m}} = \frac{F_{AN_{BwO}} + F_{AN_{PhO}}}{2} \quad (10-5)$$

10.4 MATHEMATISCHER ZUSAMMENHANG PHO-BWO

Die Wechselwirkung zwischen PhO und BwO wurde bereits in Abschnitt 10.2 erläutert. Jetzt wird der Kompromisspunkt beider Betrachtungen mathematisch hergeleitet.

$$F_{AN(i)} = \frac{F_{BwO(i)}}{F_{PhO(i)}}$$

$$F_{AN(i)} \cdot F_{PhO(i)} = F_{BwO(i)}$$

Kombiniert mit den Gleichungen (8-7) und (7-3) verändert sich die Gleichung zu:

$$F_{AN(i)} \cdot \left\{ 1 + \frac{V_{ver(i)}^B}{V_{Pho}^B} \right\} = \frac{C_0 C_{(i)}}{C_0 C_{(Bwo)}}$$

Wird der Anlagenfaktor mit eins festgelegt, ergibt sich ein Kompromiss zwischen PhO und BwO, sodass beide den gleichen Abstand zu ihrem Optimum haben. Anschließend wird die Gleichung nach x umgestellt und aufgelöst. Im Anhang unter Kapitel III Abschnitt e befindet sich eine Herleitung.

$$F_{AN} = 1 = \frac{F_{Bwo}}{\frac{V_{Pho}^B + V_{verl}^B}{V_{Pho}^B}} = \frac{F_{Bwo}}{1 + \frac{V_{verl}^B}{V_{Pho}^B}}$$

$$F_{AN(i)} = 1 = \frac{\frac{C_0 C_{(i)}}{C_0 C_{Bwo}}}{1 + \frac{V_{verl(i)}^B}{V_{Pho}^B}} = \frac{\frac{A_{0(i)} + K_{OK(i)} + K_{Recyc(i)}}{A_{0(Bwo)} + K_{OK(Bwo)} + K_{Recyc(Bwo)}}}{1 + \frac{V_{verl(i)}^B}{V_{Pho}^B}}$$

Umgestellte Gleichung nach der Erstinvestition:

$$A_{0(i)} = F_{AN(i)} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl(i)}^B}{V_{Pho}^B} \right) \cdot (A_{0(Bwo)} + K_{OK(Bwo)} + K_{Recyc(Bwo)}) - K_{OK(i)} + K_{Recyc(i)}$$

In der folgenden Gleichung sind die aus der Voranalyse bekannten Parameter in Rot dargestellt. Die unbekannten Parameter (violett) hingegen sind von der Systemvariable x abhängig:

$$A_{0(i)} = F_{AN(i)} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl(i)}^B}{V_{Pho}^B} \right) \cdot (A_{0(Bwo)} + K_{OK(Bwo)} + K_{Recyc(Bwo)}) - K_{OK(i)} + K_{Recyc(i)}$$

Aufschlüsselung der Unbekannten für eine Lösung nach der Systemvariable x :

$$\frac{A_{0(x)} + K_{OK(x)} + K_{Recyc(x)}}{\left(1 + \frac{V_{verl(x)}^B}{V_{Pho}^B} \right)} = F_{AN(i)} \cdot (A_{0(Bwo)} + K_{OK(Bwo)} + K_{Recyc(Bwo)})$$

Die Investitionskosten zum Erreichen der betriebswirtschaftlichen und physikalischen Optima sind bereits bekannt. Eine einfache Untersuchung der Investitionskosten ist möglich, wenn keine Degression in der Investition vorhanden ist. Dann handelt es sich um eine lineare Investitionsgerade (Gleichung (10-6)). Die gezeigten Kosten stellen evtl. nur die Mehrkosten für die zusätzlichen Aufwendungen dar. Die Grundkosten für den Wärmeübertrager ohne eine Isolierung müssen als Summand zu den linearen Isolationskosten addiert werden (Gleichung (10-7)).

$$A_{0(i)} = a_0 \cdot x_{(i)} \quad (10-6)$$

$$A_{0(i)} = a_0 \cdot x_{(i)} + A_{0GI} \quad (10-7)$$

Oder aus der Sicht der anderen Konfigurationen:

$$A_{0(i)} = A_{0Pho} - a_0 \cdot (x_{Pho} - x_{(i)})$$

$$A_{0(i)} = A_{0BwO} + a_0 \cdot (x_{(i)} - x_{BwO})$$

Sich ergebende Randbedingungen:

$$0 \leq A_{0(i)} \leq A_{0PhO}$$

$$0 \leq x_{(i)} \leq x_{PhO}$$

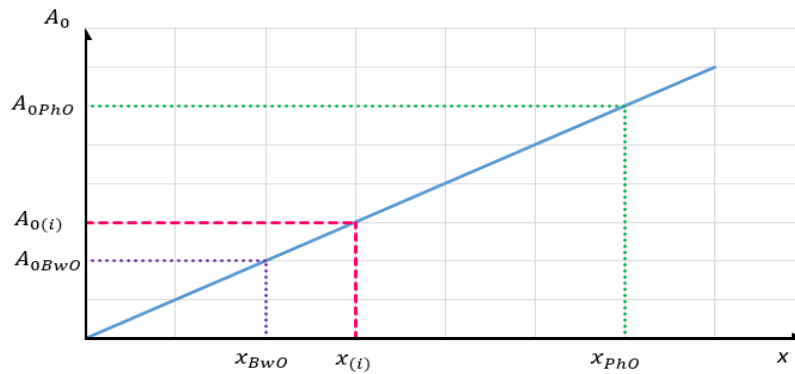


Abbildung 10-5: Verlauf linearer Investitionskosten

Der Investitionskostenverlauf, inklusive einer Degression, wird durch eine Potenzfunktion genähert, die sich in der Regel nach Gleichung (10-8) aufstellen lässt. In der Praxis ist ein häufiger Näherungswert für eine Mengenverdopplung eine Preissteigerung um den Faktor Wurzel zwei. In der angegebenen Gleichung entspräche das einer Potenz von 0,5.

$$A_{0(i)} = a_0 \cdot (x_{(i)})^n \quad (10-8)$$

$$A_{0(i)} = a_0 \cdot (x_{(i)})^n + A_{0GI} \quad (10-9)$$

In den Operationskosten sind einige Faktoren nach Gleichung (8-6) einbezogen. Diese fließen häufig unterschiedlich in die Analyse ein, was eine detaillierte Analyse der Anlage erfordert. In vereinfachten Simulationen werden die laufenden Kosten der Wartungen und Reparaturen sowie die Rohstoffkosten auf den Energieverbrauch bezogen (Gleichung (10-10)). Die Energiekosten wandeln sich durch das Hinzufügen der übrigen Operationskosten zu den spezifischen Operationskosten nach Gleichung (10-11).

Diese Methode verringert die einzelnen Komponenten und sorgt für eine bessere Übersichtlichkeit. Sie kann aber nur angewendet werden, wenn die Teuerungsraten der einzelnen Elemente identisch sind.

$$K_{OK} = k_{el} \cdot V_{(i)}^B + K_{PEK} + K_{RSK} + K_{RK} + K_{WK}$$

$$K_{OK} = V_{(i)}^B \cdot k_{OK,e} \quad (10-10)$$

$$k_{OK,e} = k_{el} + \frac{K_{RSK} + K_{RK} + K_{WK}}{V_{(i)}^B} \quad (10-11)$$

Randbedingungen für die Operationskosten:

$$V_{PhO(i)}^B \leq V_{(i)}^B < V_0^B$$

$$0 \leq x_{(i)} \leq x_{PhO}$$

Lineare Gleichung für die Operationskosten (dunkelblauer Graph, Abbildung 10-6).

$$V_{(i)}^B = V_0^B - m \cdot x_i \quad (10-12)$$

m = Koeffizient für die Steigung

Formel für den Steigungskoeffizienten:

$$m = \frac{V_{PhO}^B - V_{BwO}^B}{x_{PhO} - x_{BwO}} \quad (10-13)$$

Mithilfe des Koeffizienten lässt sich der Energieverbrauch berechnen. Sollte jedoch der Wert V_0 ebenfalls unbekannt sein, kann eine Berechnung über das Physikalische Optimum durchgeführt werden.

$$V_{(i)}^B = V_{PhO}^B + m \cdot (x_{PhO} - x_i)$$

Ist der Verlauf nicht linear, was in den meisten Anlagen der Fall sein wird, dann kann der Verlauf mithilfe einer gebrochenen rationalen Funktion beschrieben werden. Der resultierende Verlauf einer solchen Funktion ist in bestimmten Bereichen nicht lösbar. Ohne eine Verschiebung der gebrochenen rationalen Funktion kann bei der Nullstelle kein Wert ermittelt werden. Daher müssen diese Anwendungen mit besonderer Vorsicht in den Extrempunkten betrachtet werden.

Die Verschiebung lässt sich auf den Startverbrauch ($x = 0$) der Anlage nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$V_{(i)}^B = \frac{V_0^B}{(x + a_2)^{a_3}} \quad (10-14)$$

Dieses Verhalten muss individuell auf die jeweilige Anlage angepasst werden.

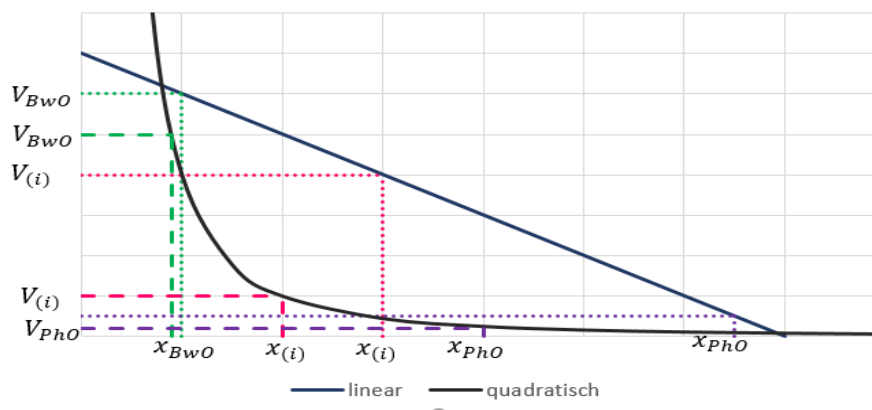


Abbildung 10-6: Betriebskosten linear/quadratisch

Sind die Funktionen für die Betriebskosten und die Investitionskosten bekannt, wird eine Gleichung nach der Systemvariablen aufgestellt und aufgelöst.

10.5 ANLAGENDIMENSIONIERUNG PHO-BWO-CFO

10.5.1 LINEARE KOMPROMISSFINDUNG

Anschließend soll der Kompromisspunkt zwischen dem PhO und dem BwO um den CFO erweitert werden. Ziel ist eine Systemgestaltung, die einen optimalen Kompromiss zwischen den jeweiligen Bewertungen aufweist. Das genutzte Verfahren der Gleichwertigkeit aus Abschnitt 10.2 kann nicht einfach angewendet werden. Es kann nicht vorausgesetzt werden, dass alle Komponenten eine gleiche Abweichung bei demselben Anlagenvariablenwert aufweisen.

Eine reine lineare Anlagenkompromissfindung könnte über eine Definition der Anlagenfaktoren für die drei Betrachtungsansichten stattfinden. Als Beispiel ist in der folgenden Gleichung der Anlagenfaktor für die Anlagenkonfiguration nach dem PhO aufgestellt, basierend auf Gleichung (10-1).

$$F_{AN_{PhO}} = \frac{F_{BwO_{PhO}}}{F_{PhO_{PhO}}}$$

$$F_{AN_{BwO-PhO-CFO}} = \left[\frac{F_{BwO_{PhO}}}{F_{PhO_{PhO}}} + \frac{F_{BwO_{BwO}}}{F_{PhO_{BwO}}} + \frac{F_{BwO_{CFO}}}{F_{PhO_{CFO}}} \right] \cdot \frac{1}{3}$$

Nicht zu empfehlen!
 Übermäßiger Einfluss
 des PhO-Anlagenfaktors

Ein Problem bei dieser Vorgehensweise resultiert aus der Wertigkeit der unterschiedlichen Anlagenfaktoren. Es ist zu erwarten, dass der Anlagenfaktor nach dem optimalen PhO einen deutlich höheren Wert als bei der Bewertung nach dem BwO oder dem CFO aufweist. Hier würde die höhere Gewichtung für einen größeren Einfluss auf das Gesamtergebnis sorgen und eine Verschiebung zum Nachteil der niedrigeren Werte erzeugen. Aus diesem Grund werden die einzelnen Anlagenfaktoren auf die Summe der Anlagenfaktoren gegenläufig bezogen.

$$F_{AN_{BwO-PhO-CFO}} = \frac{F_{AN_{PhO}} \cdot \left[1 - \frac{F_{AN_{PhO}}}{F_{AN_{ges}}} \right] + F_{AN_{BwO}} \cdot \left[1 - \frac{F_{AN_{BwO}}}{F_{AN_{ges}}} \right] + F_{AN_{CFO}} \cdot \left[1 - \frac{F_{AN_{CFO}}}{F_{AN_{ges}}} \right]}{3}$$

Nicht zu empfehlen!
 Instabil bei kleinen Anlagenfaktoren

Erweitert könnte die Gleichung mit Gewichtungsfaktoren versehen werden.

$$G_{ges} = G_{PhO} + G_{BwO} + G_{CFO}$$

$$G_{ges} = 100 \%$$

$$F_{AN_{BwO-PhO-CFO,G}} = \frac{F_{AN_{PhO}} \cdot G_{PhO} \cdot \left[1 - \frac{F_{AN_{PhO}}}{F_{AN_{ges}}} \right] + F_{AN_{BwO}} \cdot G_{BwO} \cdot \left[1 - \frac{F_{AN_{BwO}}}{F_{AN_{ges}}} \right] + F_{AN_{CFO}} \cdot G_{CFO} \cdot \left[1 - \frac{F_{AN_{CFO}}}{F_{AN_{ges}}} \right]}{100\%}$$

Nicht zu empfehlen!
 Instabil bei kleinen Anlagenfaktoren

Hier ist jedoch auf ein Überspringen zu achten, welches bei zu kleinem Einfluss einer Anlagenvariable entsteht.

In Abbildung 10-7 sind die Verläufe des Anlagenfaktors in Abhängigkeit unterschiedlicher Gewichtungen abgebildet. Zweckmäßig für eine grafische Darstellung wäre eine vierdimensionale Visualisierung. Da solche Grafiken sehr abstrakt wirken, wurde eine zweidimensionale Grafik mit unterschiedlichen Y-Achsen gewählt. Die Anlagengewichtung nach dem BwO und dem CFO teilen sich dabei die Ordinate auf der linken Grafikseite. Die Anlagengewichtung nach dem PhO befindet sich auf der Abszisse. Die rechte Ordinate beschreibt den Anlagenfaktor, der als Kompromiss resultiert. Zu beachten ist der Unterschied zwischen dem Ergebnis ohne und mit einem Ausgleich. Der Einfluss der Anlagenkonfiguration nach dem PhO hat einen signifikant großen Einfluss auf den resultierenden Anlagenfaktor.

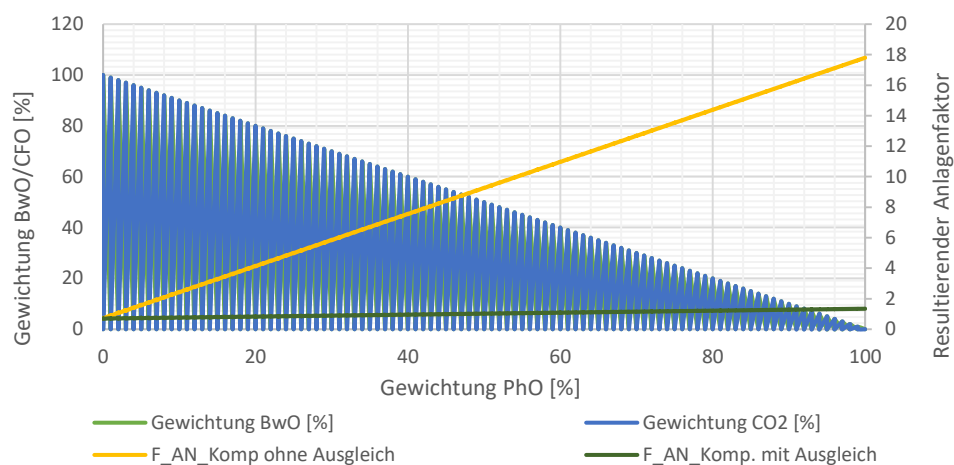


Abbildung 10-7: Gewichtungsvariation PhO, BwO und CFO

Eine reine Betrachtung der Anlagenfaktoren und eine lineare Zusammenführung stellt sich als sehr instabil heraus. Aus diesem Grund ist eine lineare Bewertung nicht zu empfehlen, und es wird im folgenden Abschnitt eine spezielle Kompromissfindung entwickelt.

10.5.2 SPEZIELLE KOMPROMISSFINDUNG

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die lineare Gleichung zu einer Instabilität neigt, sobald sich die Gewichtungen aus dem Gleichgewicht bewegen. Aus diesem Grund wird eine alternative Berechnungsmöglichkeit entwickelt, die in zwei Schritten durchgeführt wird. Im ersten Schritt wird der Anlagenfaktor für die Wechselwirkungsbetrachtung zwischen dem PhO und dem BwO nach Abschnitt 10.2 und in dem beschriebenen Sonderfall von Abschnitt 10.3 durchgeführt. Anschließend folgt die Einbindung der Anlagengestaltung nach dem Carbon Footprint (Abbildung 10-8).

Basierend auf der Anlagendimensionierung mit nur zwei Einflussparametern aus Abschnitt 10.2 befindet sich die optimale Anlage in dem optimalen Kompromisspunkt, wenn die Abweichungen zwischen dem BwO-Faktor und dem PhO-Faktor zu ihren Optima identisch sind.

$$F_{AN_{BwO-PhO}} = 1$$

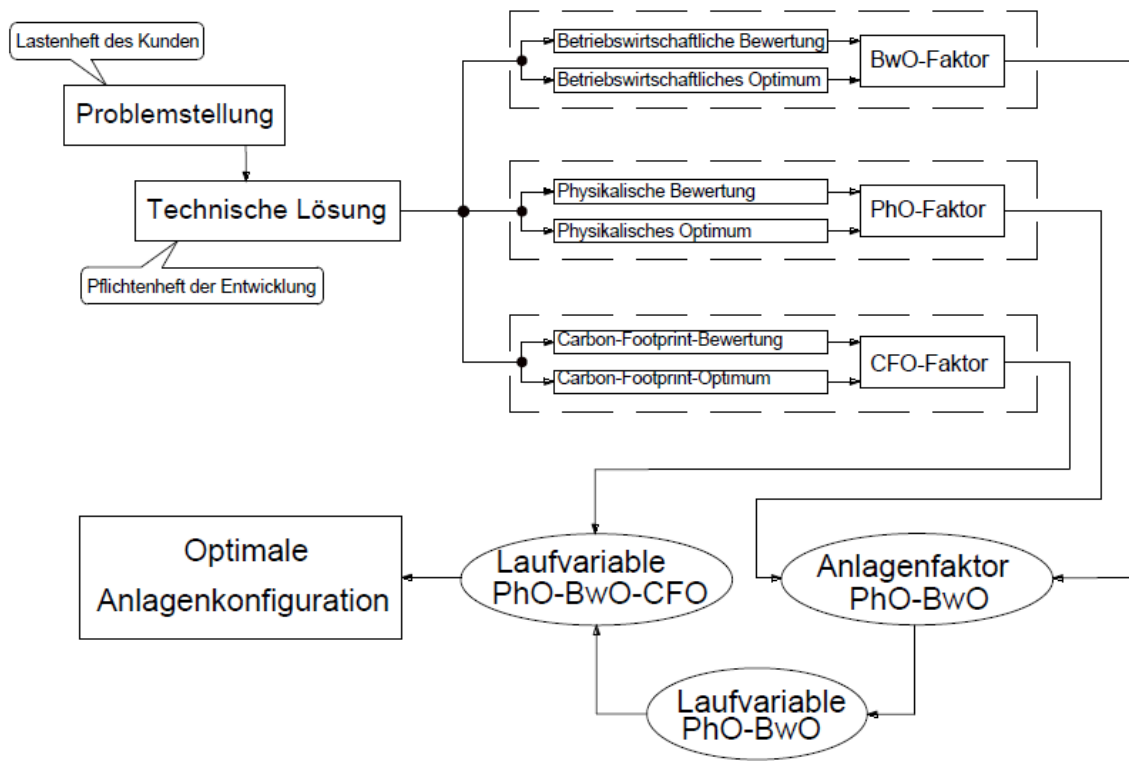


Abbildung 10-8: Konzeptionsablauf Wechselwirkungsanalyse

Somit ist der Anlagenfaktor gleich eins für den Kompromisspunkt, außer es handelt sich um eine Grenze des Anlagenfaktors nach Abschnitt 10.3. Anschließend wird die Berechnung mit der Anlagendimensionierung nach dem Carbon Footprint zusammengeführt.

Eine Kombination über die jeweiligen Anlagenfaktoren kann nicht empfohlen werden, da es auch hier zu einer einseitigen Dominanz eines verhältnismäßig großen PhO-Faktors kommen kann:

$$F_{AN_{BwO-PhO-CFO}} = \frac{F_{AN_{PhO-BwO}} + F_{AN_{CFO}}}{2}$$

Es wird empfohlen, den Kompromisspunkt über den Mittelwert der Systemvariable SV aus der Wechselwirkungsanalyse durchzuführen (Gleichung (10-15)).

$$SV_{BwO-PhO-CFO} = \frac{SV_{BwO-PhO} + SV_{CFO}}{2} \quad (10-15)$$

Als Erweiterung ist in dieser Gleichung eine Gewichtung der Einflussparameter möglich. Sollen alle Einflüsse eine relative „Gleichwertigkeit“ erfahren, dann sollte der Anlagenfaktor mit zwei Drittel der Gewichtung ausgestattet werden.

$$g_{ges} = g_{BwO-PhO} + g_{CFO} = 100\% \quad (10-16)$$

Die Summe der Gewichtungen muss immer identisch mit den Einzelgewichtungen sein. Dabei sind die einhundert Prozent zwingend erforderlich, ansonsten müsste Gleichung (10-17) angepasst werden:

$$SV_{BwO-PhO-CFO,g} = \frac{SV_{BwO-PhO} \cdot g_{BwO-PhO} + SV_{CFO} \cdot g_{CFO}}{2} \quad (10-17)$$

10.6 ERGEBNIS WECHSELWIRKUNGSANALYSE

Das hier entwickelte Verfahren der Wechselwirkungsanalyse über den Anlagenfaktor ermöglicht eine Systemauslegung unter der Berücksichtigung verschiedener Gestaltungscharakteristiken. Hergeleitet wurde eine Analyse der Wechselwirkung zwischen ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Die Prämissen der Ökonomie wurden über eine abgewandelte Kapitalwertmethode zu einem lokalen Betriebswirtschaftlichen Optimum (BwO) geführt. Die Ökologie erhielt Einzug in die Gleichungen über das Physikalische Optimum (PhO) und den Carbon Footprint (CFO), wobei das Physikalische Optimum einen absoluten Grenzwert darstellt. Kohärente Verhaltensweisen bzw. Variablen zwischen den unterschiedlichen Ansätzen wurden genutzt, um die Wechselwirkungen zu beschreiben. Somit kann eine Anlagengestaltung im Schnittpunkt der unterschiedlichen Einflusskategorien realisiert werden (Abbildung 10-9).

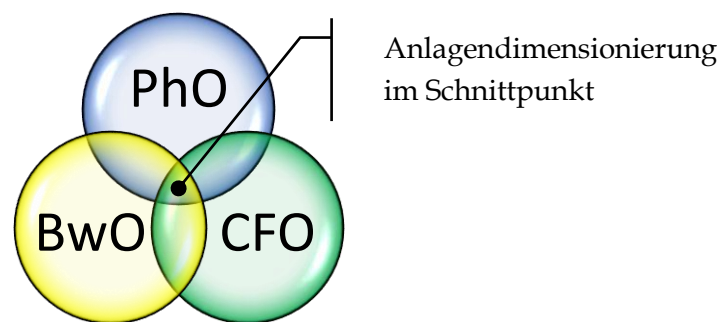


Abbildung 10-9: Anlagengestaltung im Schnittpunkt von Betriebswirtschaftlichem, Physikalischem und Carbon-Footprint-Optimum

Eine Systementwicklung unter der Wechselwirkung von Ökonomie und Ökologie kann den Vorteil der Nachhaltigkeit in die Unternehmen tragen. Bei der Anlagengestaltung werden zwei der drei Säulen der Nachhaltigkeit berücksichtigt. Dies führt zu einer Steigerung der Akzeptanz für das unternehmerische Handeln gegenüber den Stakeholdern. Über das Verfahren des PhO wird zusätzlich die Ressourceneffizienz in die Bilanzierung mit eingebunden, woraus weitere ökonomische und ökologische Vorteile entstehen können. Eine zusätzliche Gewichtung kann die Prämissen der Bewertung integrieren und somit die Individualität steigern. Für die Definition der Gewichtungen eignet sich z. B. das Verfahren der Nutzwertanalyse.

Eine grafische Zusammenfassung des Berechnungsablaufes der Wechselwirkungsanalyse inklusive einer Gleichungsbenennung befindet sich in Abbildung 10-10.

Detaillierte Beispielrechnungen befinden sich in Kapitel 11, ausführliche Herleitungen der entwickelten Gleichungen im Anhang Kapitel III.

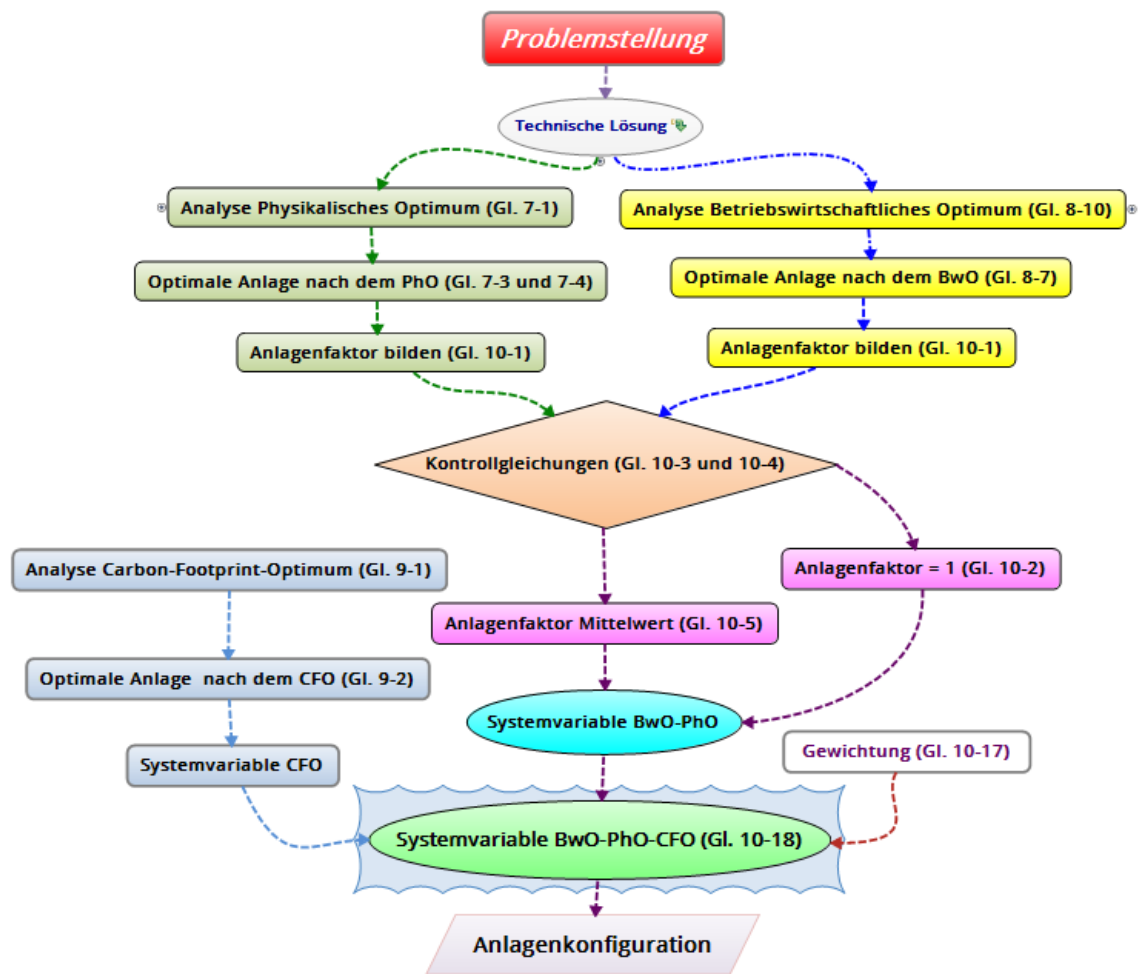


Abbildung 10-10: Ablauf Wechselwirkungsanalyse und Anlagenkonfiguration

11 ANWENDUNG DER WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN PHO, BWO UND CFO

In der kommenden Analyse werden die Erkenntnisse aus Kapitel 10 angewendet und eine Anlagendimensionierung durchgeführt.

Eine einfache Anlage zur Wassererwärmung soll hier als Projektvorschau dienen. Das Ziel der Anlage ist eine konstante Erwärmung eines fließenden Mediums durch einen isolierten Wassererhitzer. Dieser arbeitet mit einer elektrischen Heizspirale. Der idealisierte elektrische Wirkungsgrad der Heizspirale liegt bei einhundert Prozent. Diese und weitere idealisierte Annahmen reichen für eine erste Analyse aus; sie sind in Tabelle 19-1 zusammengestellt (Anhang 19). Das Modell ist in Abbildung 11-1 dargestellt. Betrachtet werden die Energieströme über die Bilanzgrenze. Die eingesetzten Gleichungen und die Herleitungen befinden sich im Anhang Kapitel III. Der Wassererhitzer hat ein umschlossenes Volumen von 1 m^3 in Form eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Meter.

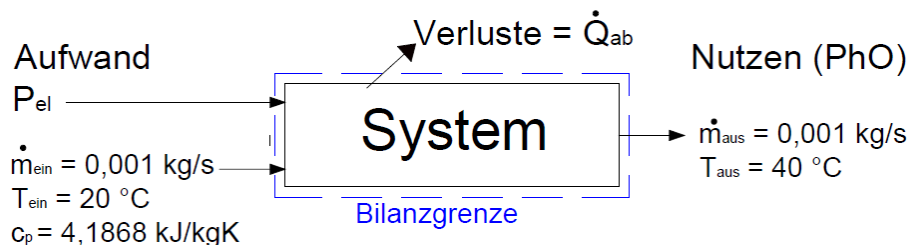


Abbildung 11-1: Bilanzsystem Wärmewürfel (WW)

11.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Das Physikalische Optimum entspricht der aufgenommenen Wärmemenge des Wassers und wird über Gleichung (11-1) definiert. Hierbei findet keine Unterscheidung zwischen der Exergie und Anergie statt. Das perfekte System hat keinerlei Wärmeverluste an die Umgebung. In diesem Fall müsste das System als adiabat betitelt werden. Da eine vollkommene Isolierung technisch nicht möglich ist, erleidet das System durch die Isolierung hindurch einen Wärmeverlust an die Umgebung. Der Wärmeverluststrom wird nach Gleichung (11-2) berechnet. Dabei geht man von einer kompletten Vermischung des Mediums in dem isolierten Wärmeüberträger aus. Der PhO-Faktor resultiert aus dem realen Energieeinsatz für die elektrische Heizung, bezogen auf den physikalischen Optimalverbrauch (Gleichung (11-3)).

$$\dot{Q}_{\text{nutz}} = \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW\text{aus}} - T_{WW\text{ein}}) \quad (11-1)$$

$$\dot{V}_{\text{PhO}}^B = \dot{Q}_{\text{nutz}}$$

$$\dot{Q}_{\text{ab}} = k \cdot A \cdot (T_{WW\text{aus}} - T_{\text{umg}}) \quad (11-2)$$

$$f_{\text{PhO}} = \frac{P_{\text{heiz}}}{\dot{V}_{\text{PhO}}^B} \quad (11-3)$$

Für die Wärmeverluste ist zum einen der Wärmedurchgangskoeffizient k und zum anderen die wärmeübertragende Oberfläche A entscheidend. Beide Variablen sind dabei abhängig von der Isolierstärke s . Die Temperaturdifferenz des Systems zur Umgebung ist ebenfalls entscheidend für die Wärmeverluste, jedoch wird diese Differenz in den kommenden Berechnungen als konstant angenommen.

Die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} sind nach der DIN EN ISO 6946³³ für den Zustand ausgewählt, dass keine erzwungene Luftbewegung an der Oberfläche stattfindet.

$$R_T = R_{si} + R_{wand} + R_{se} \quad (11-4)$$

$$R_{wand} = \frac{s}{\lambda} \quad (11-5)$$

$$A_{WW,horz} = 2 \cdot (l + s \cdot 2) \cdot (b + s \cdot 2) \quad (11-6)$$

$$A_{WW,vert} = 4 \cdot (l + s \cdot 2) \cdot (h + s \cdot 2) \quad (11-7)$$

$$\dot{Q}_{WW,vert} = \left(\frac{1}{R_{T,hor}} \cdot A_{WW,hor} + \frac{1}{R_{T,vert}} \cdot A_{WW,vert} \right) \cdot (T_{WW,aus} - T_{umg})$$

$$\dot{Q}_{heiz} = \dot{Q}_{nutz} + \dot{Q}_{WW,vert} \quad (11-8)$$

$$P_{heiz} = \frac{\dot{Q}_{heiz}}{\eta_{heiz}} \quad (11-9)$$

Die Investitionskosten für den Wassererhitzer werden in den kommenden Berechnungen vernachlässigt, lediglich die Isolierkosten fließen als Funktion der Isolierstärke s ein:

$$I_{Iso} = V_{Iso} \cdot k_i \quad (11-10)$$

$$K_I = \sum_{AK}^e I_{Iso}$$

$$K_V = P_{el} \cdot 8760 \text{ h} \cdot n \cdot k_{el}$$

$$K_{V,a} = K_V \cdot (1 + TR)^t$$

11.1.1 ANLAGENDIMENSIONIERUNG NACH DEM PHO

Nachdem eine technische Lösung anhand eines Lastenheftes gefunden wurde, wird der Wirkprozess physikalisch beschrieben. In dem Beispielfall ist die physikalische Wirkleistung die Erwärmung des zirkulierenden Wassers durch den Wärmeübertrager von einer Starttemperatur auf die gewünschte Endtemperatur (Gleichung (11-1)). Somit steht der physikalische Optimalverbrauch bereits fest. Aktuell handelt es sich um einen Leistungswert, der keine zeitliche Dimension umfasst. Erst das Produkt mit einer Zeitspanne beschreibt die Arbeit und rückwirkend einen Verbrauch. Dies ist aber bei der Analyse zum PhO irrelevant, da sich die Zeiten herauskürzen.

³³ Vgl. Reick, M., Palecki, S. (1999), S. 4

Die Beschreibung der Verlustleistung erfolgt mit der Gleichung für den Wärmedurchgang nach Abschnitt 11.1.

Die Wärmeübertragungswiderstände spielen bei den Wärmeverlusten (Gleichung (11-4)) eine untergeordnete Rolle. Die signifikante Größe ist die Wärmeleitfähigkeit der Isolierung in Abhängigkeit von der Isolierstärke s . Ebenso ist die Wärmeleitfähigkeit der Behälteraußenwand zu hoch, um einen signifikanten Einfluss auf die Berechnungen zu haben. Aus diesem Grund wird folgende Vereinfachung getroffen:

$$R_T = \overset{=0}{R_{si}} + R_{wand} + \overset{=0}{R_{se}} \quad (11-11)$$

Daraus folgt:

$$R_T = R_{wand} = \frac{s}{\lambda}$$

Nun ist auch kein Unterschied zwischen einer horizontalen und einer vertikalen Wärmeübertragungsfläche mehr vorhanden, was zu der folgenden Veränderung der Gleichung (11-2) führt. Das angefügte e an den Wärmeverlust beschreibt die vereinfachte Gleichung:

$$\dot{Q}_{verl,e} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \quad (11-12)$$

Die Oberfläche verändert sich mit zunehmender Isolierstärke. Hierbei wird ihr Median betrachtet:

$$A = 6 \cdot (l + s)^2 \quad (11-13)$$

Der tatsächliche Leistungsbedarf der Anlage lässt sich folglich über Gleichung (11-14) beschreiben, wobei die Verlustleistung abhängig von der Isolierstärke s ist:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{sys(s)}^B &= \dot{Q}_{nutz} + \dot{Q}_{verl,e(s)} \\ \dot{V}_{sys(s)}^B &= \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \end{aligned} \quad (11-14)$$

In einem ersten Schritt wird die Gleichung nach der Anlagenvariablen abgeleitet und anschließend danach aufgelöst. Dafür wird die erste Ableitung zu null gesetzt. Mathematisch wird der Punkt des Graphen mit einer Steigung von null gesucht (lokales Minimum oder Maximum der Funktion).

$$\begin{aligned} f(s) &= \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \\ f'(s) &= \left[\dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right] \frac{d}{ds} \\ f'(s) &= \frac{-6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot (s^2 - l^2)}{s^2} \end{aligned}$$

Zu null gesetzt und nach s aufgelöst ergibt sich:

$$s_{PhO} = s_{VPhO} = 1000 \text{ mm}$$

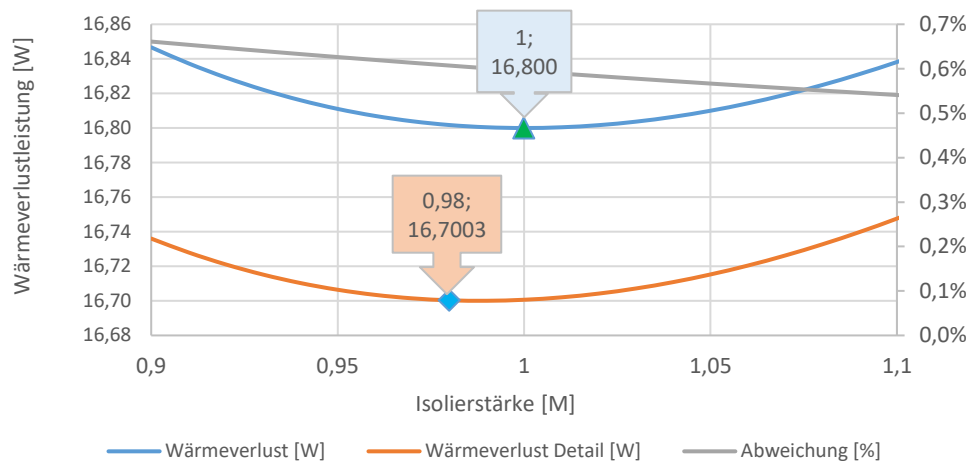


Abbildung 11-2: Verlustleistung in Abhängigkeit von der Isolierstärke

Abbildung 11-2 basiert auf Gleichung (11-2) in zwei verschiedenen Variationen. Der Graph Wärmeverlust wurde mit der vereinfachten Gleichung ohne die Übergangswiderstände der Medien berechnet, Gleichung (11-12). Der Graph Wärmeverlust Detail ist inklusive den Übergangswerten aus der DIN EN ISO 6946. Die Differenz nimmt mit steigendem Einfluss der Isolierung ab und liegt im Bereich des optimalen PhO-Faktors unter 0,31 %. Das Physikalische Optimum der gewählten Isolierung wird bei einer Isolierstärke von 0,98 m bis 1 m erreicht. Detailliertere Berechnungen befinden sich im Anhang Kapitel III. Anschließend können alle Faktoren für die Dimensionierung nach der optimalen Anlagenkonfiguration gemäß dem PhO berechnet werden.

$$\dot{V}_{sys(PhO)}^B = \dot{Q}_{nutz(PhO)} + \dot{Q}_{verl(PhO)}$$

$$\dot{V}_{sys(PhO)}^B = 83,72 \text{ W} + 16,8 \text{ W} = 100,52 \text{ W}$$

Berechnung des PhO-Faktors für die optimale Anlage mit dem gewählten Wärmeleitwert der Isolierung:

$$f_{PhO_{PhO}} = 1 + \frac{16,8 \text{ W}}{83,72 \text{ W}}$$

$$f_{PhO_{PhO}} = F_{PhO_{PhO}} = 1,2$$

Für die betriebswirtschaftliche Analyse muss die Zeit eingebunden werden. Die Anlage soll zwanzig Jahre lang, sieben Tage die Woche und vierundzwanzig Stunden am Tag betrieben werden. Des Weiteren wird von einer Teuerungsrate von 3 Prozent der Betriebsstoffe ausgegangen. Wartungskosten, Personalkosten, Rohstoffkosten und Reparaturkosten werden nicht betrachtet. Ebenso wird keine Verzinsung eingebunden.

Der Teuerungsfaktor TZ wird über Gleichung (8-8) aus Abschnitt 8.4 berechnet:

$$TZ_{Faktor} = \frac{((TZ + 1)^n - 1) \cdot (TZ + 1)}{(n \cdot TZ)}$$

$$TZ_{Faktor} = 1,38382$$

$$C_0 C_{PhO} = A_0 (PhO) + K_{BSK(x)} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} + K_{Recyc(x)}$$

$$C_0 C_{PhO} = ([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_l + \dot{V}_{sys(PhO)}^B \cdot k_{el} \cdot 20 \text{ a} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{a} \cdot TZ_{Faktor} + ([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_{Recyc}$$

Mit eingesetzten Zahlenwerten aus der Tabelle 19-1:

$$C_0 C_{PhO} = ([1 \text{ m} + 2 \text{ m}]^3 - 1 \text{ m}^3) \cdot \frac{50 \text{ €}}{\text{m}^3} + 0,10052 \text{ kW} \cdot \frac{0,25 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot 20 \text{ a} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{a} \cdot 1,38382 \\ + ([1 \text{ m} + 2 \text{ m}]^3 - 1 \text{ m}^3) \cdot 15 \text{ €/m}^3$$

$$C_0 C_{PhO} = 7783,62 \text{ €}$$

Die Berechnung des BwO-Faktors ist noch nicht möglich, da dieser Zustand noch nicht analysiert wurde. Dies ist Gegenstand des nächsten Abschnitts.

11.1.2 ANLAGENDIMENSIONIERUNG NACH DEM BWO

Für die Anlagendimensionierung nach dem Betriebswirtschaftlichen Optimum werden die anfallenden Lebenszykluskosten nach der Gleichung (8-10) bilanziert.

$$f'(s) = [A_0(s) + K_{BSK(s)} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc(s)}] \frac{d}{ds}$$

Damit die Ableitung den niedrigsten Punkt der Funktion untersuchen kann, werden die Aufwendungen als positiv angesehen.

$$f'(s) = \left[([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_l + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WWaus} - T_{WWein}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WWaus} - T_{Umg}) \right\} \cdot k_{el} \cdot n \right. \\ \left. \cdot TZ_{Faktor} + ([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_{Recyc} \right] \frac{d}{ds}$$

$$f'(s) = \left[\frac{(24\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^4)}{s^2} + \frac{24l\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^3}{s^2} + 6\{\Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + l^2 \cdot (k_i + k_{Recyc})\} \right. \\ \left. - \frac{6l^2 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n}{s^2} \right]$$

$$f'(x) = 24 \cdot \{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^2 + 24 \cdot l \cdot \{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s + 6 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + 6 \cdot l^2 \cdot (k_i + k_{Recyc}) \\ - \frac{6 \cdot l^2 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n}{s^2}$$

Dies ergibt nach s aufgelöst und inklusive der Umrechnung für die Betriebskosten:

$$s^2 \cdot (4000 \cdot \{k_i + k_{Rec}\} \cdot s^2 + 4000 \cdot l \cdot \{k_i + k_{Rec}\} \cdot s + \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + 1000 \cdot l^2 \cdot \{k_i + k_{Rec}\}) \\ = l^2 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n$$

Eine detailliertere Betrachtung der Gleichung mit eingesetzten Werten und einer kompletten Wertetabelle befindet sich im Anhang Kapitel III.

Mit den Werten aus Tabelle 19-1 und den bisherigen Zwischenergebnissen, ergeben sich für die Isolierstärke s folgende Lösungen:

$$s_1 = -0,801448 \text{ m}$$

$$s_2 = SV_{BwO} = 0,406893 \text{ m} \approx 407 \text{ mm}$$

Zur Kontrolle werden beide Werte positiv in die Ursprungsgleichung eingesetzt und gegenübergestellt. Der negative Isolationswert aus der Berechnung würde zu einer positiven Erstinvestition führen, was aber in der Betrachtung durch die Kapitalwertmethode nicht möglich ist. In der Überprüfung bestätigt sich, dass die Isolationsstärke von 0,407 m die geringsten Lebenszykluskosten aufweist.

$$C_0 C_{BwO,s1} = 7186,28 \text{ €}$$

$$C_0 C_{BwO,s2} = 6636,56 \text{ €}$$

Der BwO-Faktor für die Anlage nach den geringsten Lebenszykluskosten ist eins, denn diese Anlagenkonfiguration beschreibt das Betriebswirtschaftliche Optimum:

$$F_{BwOBwO} = 1$$

Mit der berechneten Isolationsstärke wird anschließend der PhO-Faktor des Systems bestimmt.

$$\dot{Q}_{verle,BwO} = \frac{0,035 \text{ W/m}^2\text{K}}{0,407 \text{ m}} \cdot 6 \cdot (1 \text{ m} + 0,407 \text{ m})^2 \cdot (20 \text{ K})$$

$$\dot{Q}_{verle,BwO} = 20,43 \text{ W}$$

$$f_{PhOBwO} = 1 + \frac{20,43 \text{ W}}{83,72 \text{ W}}$$

$$f_{PhOBwO} = F_{PhOBwO} = 1,24403$$

Über den PhO-Faktor und den BwO-Faktor kann der Anlagenfaktor nach Gleichung (10-1) bestimmt werden. Der Anlagenfaktor beschreibt das Verhältnis der unterschiedlichen Betrachtungen zueinander.

$$F_{ANBwO} = \frac{F_{BwOBwO}}{F_{PhOBwO}}$$

$$F_{ANBwO} = 0,803839$$

Ebenfalls ist es jetzt möglich, die optimale physikalische Anlagengestaltung nach dem PhO über das BwO zu bewerten und anschließend den Anlagenfaktor zu bestimmen.

$$F_{BwOPhO} = \frac{C_0 C_{(PhO)}}{C_0 C_{(BwO s2)}}$$

$$F_{BwOPhO} = 1,1728$$

Es ist zu erkennen, dass der BwO-Faktor für die Anlage, die nach dem PhO gestaltet wurde, eine deutliche Abweichung hat. Der resultierende Anlagenfaktor der Konfiguration nach dem PhO liegt aber nicht über eins. Somit ist der PhO-Faktor größer als der BwO-Faktor für die Auslegung nach dem Physikalischen Optimum. Eine Anlagenfaktorbildung nach Abschnitt 10.3 ist erforderlich.

$$F_{AN_{PhO}} = \frac{F_{BwO_{PhO}}}{F_{PhO_{PhO}}}$$

$$F_{AN_{PhO}} = 0,977233$$

11.2 ANLAGENBERECHNUNG ÜBER DEN ANLAGENFAKTOR

Basierend auf der Anlagendimensionierung mit nur zwei Einflussparametern (Abschnitt 10.2) befindet sich die optimale Anlage in einem Kompromisspunkt, wenn die Faktorendifferenzen zwischen dem BwO und dem PhO zum jeweiligen Optimum identisch sind. Diese Theorie ist nicht anwendbar, wenn sich beide Graphen zwischen den Optima nicht schneiden (Abschnitt 10.3). Dies ist bereits in Abschnitt 11.1.2 über eine Kontrollgleichung belegt worden. Um den Einfluss des falschen Anlagenfaktors aus dem PhO und dem BwO zu demonstrieren, wird im Anhang Kapitel III eine Analyse mit dem Anlagenfaktor 1 hinterlegt. Die abweichenden Ergebnisse sind in Tabelle 19-12 gegenübergestellt und ausgewertet.

$$F_{AN_{BwO-PhO}} = \frac{F_{AN_{BwO}} + F_{AN_{PhO}}}{2}$$

$$F_{AN_{BwO-PhO}} = \frac{0,803839 + 0,9772}{2}$$

$$F_{AN_{BwO-PhO}} = 0,890536$$

Weiter bekannt ist die Zusammensetzung des Anlagenfaktors. Er gibt das Verhältnis zwischen dem BwO- und dem PhO-Faktor an:

$$F_{AN_{BwO-PhO}} = \frac{F_{BwO_{BwO-PhO}}}{F_{PhO_{BwO-PhO}}}$$

Für eine bessere Übersichtlichkeit wird das der Index *BwO – PhO* unter einem gemeinsamen Index *KP* zusammengefasst. Dabei steht *KP* für den Kompromisspunkt.

$$F_{AN_{KP}} = \frac{F_{BwO_{KP}}}{F_{PhO_{KP}}}$$

$$F_{AN_{KP}} \cdot F_{PhO_{KP}} = F_{BwO_{KP}}$$

$$F_{AN_{KP}} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B}\right) = \frac{C_O C_{KP}}{C_O C_{BwO}}$$

Umgestellt ergibt sich folgende Gleichung (dabei sind alle bis hier bekannten Faktoren in Grün dargestellt):

$$C_O C_{KP} - \frac{C_O C_{BWO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B} = C_O C_{BWO} \cdot F_{AN_{KP}}$$

Die Unbekannten müssen weiter aufgeschlüsselt werden. Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} & \langle ([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_I + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right\} \cdot k_{el} \cdot t \cdot TZ_{Faktor} \\ & + ([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_{Recyc} \rangle - \frac{C_O C_{BWO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot \left\{ \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right\}}{\dot{V}_{PhO}^B} \\ & = C_O C_{BWO} \cdot F_{AN_{KP}} \end{aligned}$$

In der aufgeschlüsselten Gleichung ist nur noch die Isolationsstärke s als Unbekannte enthalten. Folglich wird die Gleichung nach s umgestellt und aufgelöst. Eine detaillierte Herleitung des Ergebnisses befindet sich im Anhang Kapitel III Abschnitt e.

$$s_{KP} = s_{BWO-PhO} = s_{V_{BWO-PhO}} = 0,77 \text{ mm}$$

Resultierende Anlagenwerte:

$$\begin{aligned} f_{PhO_{KP}} &= 1 + \frac{17,17 \text{ W}}{83,72 \text{ W}} \\ f_{PhO_{KP}} &= F_{PhO_{KP}} = 1,2051 \\ F_{BWO_{KP}} &= \frac{7111,27 \text{ €}}{6636,56 \text{ €}} \\ F_{BWO_{KP}} &= 1,07153 \\ F_{AN_{KP}} &= \frac{1,07153}{1,2051} = 0,89 \end{aligned}$$

11.3 ANLAGENDIMENSIONIERUNG NACH DEM CFO

Zur Dimensionierung der nach dem Carbon Footprint optimalen Anlage nutzt man die in Kapitel 9 eingeführten CO₂-äquivalenten Emissionen über den kompletten Lebenszyklus. Die Emissionsprodukte werden nach Gleichung (5-3) bilanziert. Auch in der Dimensionierung der Anlage nach dem CFO ist die Isolationsstärke s der Einflussfaktor für die Emissionswerte und somit die Systemvariable SV .

$$CF_{sys(s)} = CF_{Herst(s)} + CF_{Distr(s)} + CF_{Betr(s)} + CF_{Recyc(s)}$$

Die Treibhausgasemissionen für die Isolierung werden der Tabelle 19-1 entnommen und die isolationsvolumenabhängigen Parameter zusammengefasst:

$$CF_{sys_{CFO}} = \{cf_{Herst} + cf_{Distr} + cf_{Recyc}\} \cdot V_{iso} + CF_{Betr}$$

$$CF_{sysCFO} = \{cf_{Herst} + cf_{Distr} + cf_{Recyc}\} \cdot ([l + 2s]^3 - l^3) + cf_{Betr} \cdot \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WWaus} - T_{WWein}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WWaus} - T_{umg}) \right\} \cdot n$$

$$f'(s) = \left[\{cf_{Herst} + cf_{Distr} + cf_{Recyc}\} \cdot ([l + 2s]^3 - l^3) + cf_{Betr} \cdot \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WWaus} - T_{WWein}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WWaus} - T_{umg}) \right\} \cdot n \right] \frac{d}{ds}$$

Der Übersichtlichkeit halber werden die spezifischen CO₂-äquivalenten Emissionen der Isolierung zusammengefasst.

$$cf_{Iso} = cf_{Herst} + cf_{Distr} + cf_{Recyc}$$

$$f'(s) = 24 \cdot cf_{Iso} \cdot s^2 + 24 \cdot l \cdot cf_{Iso} \cdot s + 6 \cdot l^2 \cdot cf_{Iso} + 6 \cdot n \cdot cf_{Betr} \cdot \Delta T \cdot \lambda - \frac{l^2}{s^2}$$

Anschließend wird die Gleichung zu null gesetzt und nach s aufgelöst. In der kommenden Analyse werden für die Emissionsbelastungen, resultierend aus dem Betriebsverbrauch, zwei Szenarien durchgerechnet, einmal mit dem CO₂-Emissionsfaktor von 2015 und einmal mit einem aufgrund des ansteigenden Anteils erneuerbarer Energien im Stromnetz möglicherweise verbesserten zukünftigen CO₂-Emissionsfaktor. Im ersten Fall ist der berechnete CO₂-Emissionsfaktor für das Kalenderjahr 2015 von 0,535 kg CO₂-äq. /kWh eingebunden.³⁴ Der zweite Fall geht von einer Verbesserung des CO₂-Emissionsfaktors auf 0,48 kg CO₂-äq. /kWh aus.

$$s^2(4 \cdot cf_{Iso} \cdot s^2 + 4 \cdot l \cdot cf_{Iso} \cdot s^1 + n \cdot cf_{Betr} \cdot \Delta T \cdot \lambda + l^2 \cdot cf_{Iso}) = l^2 \cdot n \cdot cf_{Betr} \cdot \Delta T \cdot \lambda$$

Bei der Berechnung mit dem CO₂-Emissionsfaktor von 0,535 kg CO₂-äq. /kWh kommt man auf zwei verschiedene Ergebnisse:

$$s_1 = -0,810 \text{ m}$$

$$s_2 = SV_{CFO} = 0,422 \text{ m}$$

Eingesetzt in die Gleichung ergeben sich die folgenden CO₂-äquivalenten Emissionen:

$$CF_2 = 10204,7 \text{ kg CO}_2$$

Das negative Ergebnis hätte für eine Reduktion der Treibhausgase gesorgt. Da dies aus technischer Sicht nicht möglich ist, wurde diese Lösung aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Bei einer Verbesserung des Primärenergiefaktors auf 0,48 kg CO₂-äq. /kWh würde sich folgende Isolierstärke einstellen:

$$s_{2A} = 0,408 \text{ m}$$

$$CF_{2A} = 9202,58 \text{ kg CO}_2$$

³⁴ Vgl. Graichen, P., et al. (2017), S. 4

Aus der berechneten Isolationsstärke s für eine optimale Gestaltung nach dem CFO (Primärenergiefaktor 0,535 kg CO₂-äq. /kWh), resultieren folgende PhO- und BwO-Faktoren:

$$C_0 C_{CFO} = 6637,72 \text{ €}$$

$$F_{BwO_{CFO}} = \frac{C_0 C_{(CFO)}}{C_0 C_{(BwO \text{ } s2)}}$$

$$F_{BwO_{CFO}} = 1,00017$$

$$f_{PhO_{CFO}} = 1 + \frac{20,12 \text{ W}}{83,72 \text{ W}}$$

$$f_{PhO_{CFO}} = F_{PhO_{CFO}} = 1,2404$$

$$F_{AN_{CFO}} = \frac{F_{BwO_{CFO}}}{F_{PhO_{CFO}}} = \frac{1,00017}{1,2404} = 0,8062$$

11.4 KOMPROMISSPUNKT PHO-BWO-CFO

Um den Kompromisspunkt zwischen den drei Konfigurationen zu definieren, nutzt man das Verfahren der speziellen Kompromissfindung aus Abschnitt 10.5.2. Eine lineare Definition ist aufgrund des übermäßigen Einflusses des PhO-Faktors nicht zu empfehlen (vgl. Abschnitt 10.5.1).

$$SV_{BwO-PhO-CFO} = \frac{SV_{BwO-PhO} + SV_{CFO}}{2}$$

Auf eine Gewichtung nach Gleichung (10-17) wird verzichtet. Somit werden beide Gewichtungsfaktoren mit 50 Prozent belegt:

$$g_{ges} = g_{BwO-PhO} + g_{CFO}$$

$$g_{ges} = 100 \%$$

$$SV_{BwO-PhO-CFO,g} = \frac{SV_{BwO-PhO} \cdot g_{BwO-PhO} + SV_{CFO} \cdot g_{CFO}}{100 \%}$$

$$SV_{BwO-PhO-CFO,g} = \frac{0,77 \text{ m} \cdot 50 \% + 0,422 \text{ m} \cdot 50 \%}{100 \%}$$

$$SV_{BwO-PhO-CFO,g} = 0,596 \text{ m}$$

Abbildung 11-3 zeigt die möglichen Anlagenkonfigurationen in Variation ihrer Gewichtungen.

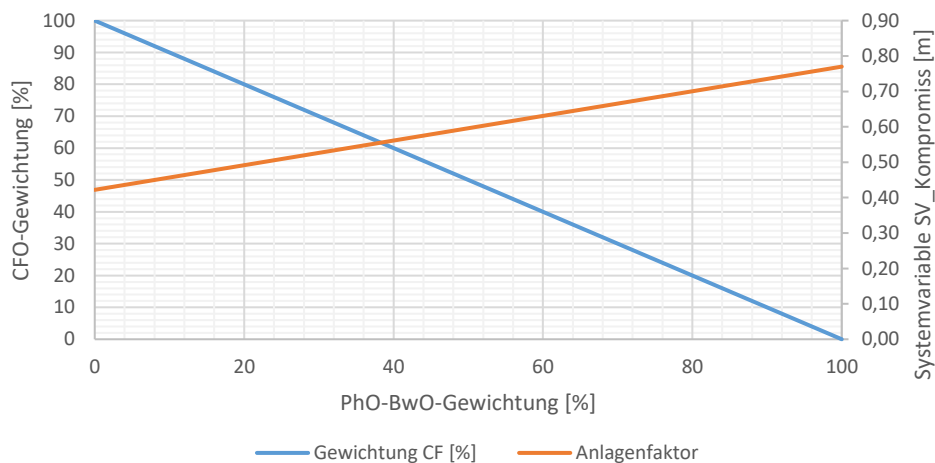


Abbildung 11-3: Anlagenkonfigurationen in Variation der Gewichtungen

Die Darstellung mit den zwei Ordinaten ersetzt eine dreidimensionale Grafik. Die linke Ordinate beschreibt die Gewichtung des Anlagenfaktors nach dem Carbon Footprint. Die Gewichtung nach der Wechselwirkung zwischen dem PhO und dem BwO wird auf der Abszisse deklariert. Die Summe der beiden Gewichtungen muss immer eins ergeben. Die resultierende Systemvariable für den Kompromiss aus dem Anlagenfaktor des CFO und dem Kompromissfaktor aus dem BwO-PhO wird auf der rechten Ordinate dargestellt.

Resultierende Anlagenwerte:

$$f_{PhOBwO-PhO-CFO} = 1 + \frac{18,03 \text{ W}}{83,72 \text{ W}}$$

$$f_{PhOBwO-PhO-CFO} = F_{PhOBwO-PhO-CFO} = 1,21536$$

$$F_{BwOBwO-PhO-CFO} = \frac{6782,93 \text{ €}}{6636,56 \text{ €}}$$

$$F_{BwOBwO-PhO-CFO} = 1,02206$$

$$F_{ANBwO-PhO-CFO} = \frac{1,02206}{1,21536} = 0,84095$$

$$F_{CFOBwO-PhO-CFO} = \frac{10821,47 \text{ kg CO}_2}{10204,7 \text{ kg CO}_2}$$

$$F_{CFOBwO-PhO-CFO} = 1,06044$$

Eine weitere Beispielanalyse befindet sich im Anhang Kapitel III. Darin wird eine Rohrleitungsdimensionierung in Abhängigkeit des inneren Durchmessers behandelt.

12 TECHNOLOGIEANALYSE

12.1 DAS VERFAHREN DER TECHNOLOGIEANALYSE

Die Technologieanalyse wird eingesetzt, um die grundlegende Technik oder Komponenten auszuwählen. Dabei muss es sich nicht zwingend um unterschiedliche Technologien handeln. Eine Auswahl verschiedener Werkstoffe ist ebenfalls denkbar. Es handelt sich bei der Technologieanalyse um eine Voruntersuchung, in der sowohl unterschiedliche Technologien als auch unterschiedliche Komponenten miteinander verglichen und ökonomisch/ökologisch beurteilt werden können. Abbildung 12-1 zeigt den Ablauf innerhalb der Analyse. In den kommenden Beschreibungen werden die unterschiedlichen Technologien und Komponenten stellvertretend als unterschiedliche Systeme benannt.

Die Technologieanalyse wird als eine Unterschleife der Anlagenkonfiguration verstanden, sie kann aber auch selbstständig fungieren. Die Betriebskosten bleiben außen vor, es sei denn, es sind signifikante Unterschiede zwischen den Systemen vorhanden.

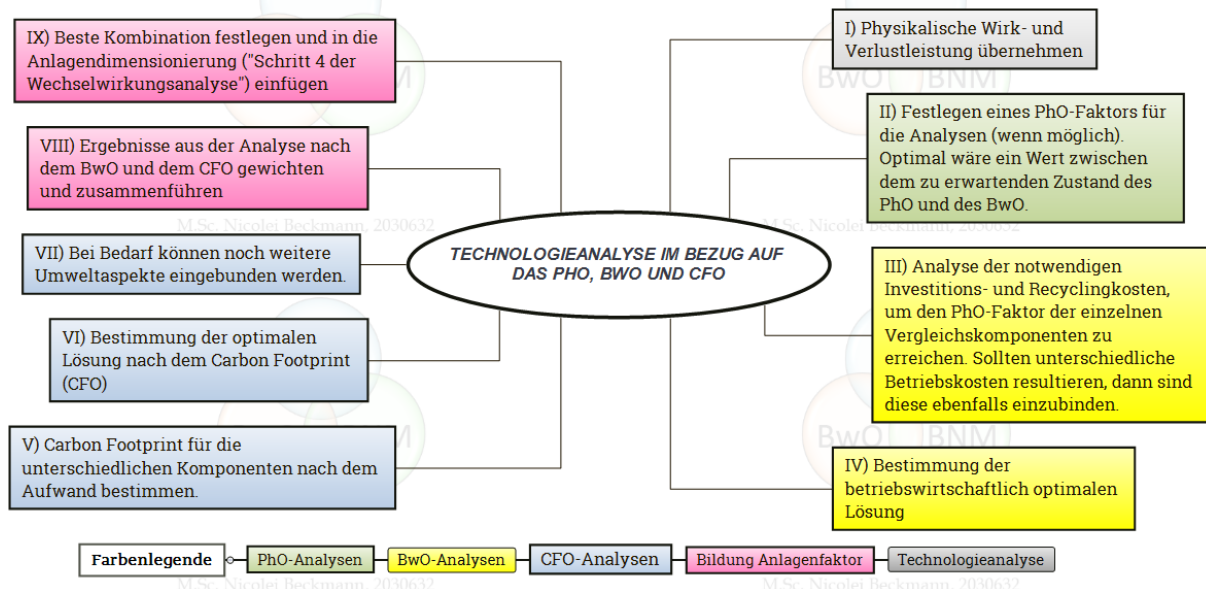


Abbildung 12-1: Ablauf der Technologieanalyse

Schritt I dient zur Festlegung der physikalischen Effekte und resultierenden Verbräuche. Ist die Technologieanalyse eine Unterschleife der Anlagenkonfiguration aus Kapitel 10, so können die Werte einfach übernommen werden. Steht die Technologieanalyse hingegen als selbstständiges Element, muss das physikalische Verhalten nach den Gleichungen aus Kapitel 7 berechnet werden.

In **Schritt II** der Technologieanalyse wird ein PhO-Faktor festgelegt. Ideal wählt man den Faktor so, dass er bereits in einem realen Bereich liegt und somit technisch realisierbar ist. Daher sollte der Faktor zwischen dem Zustand des PhO und des BwO liegen. Alle Systeme müssen diesen PhO-Faktor erreichen und werden dementsprechend konfiguriert. In Kapitel 13 befindet sich eine Beispielauslegung der Technologieanalyse.

Sollte es aus technologischer Sicht nicht möglich sein, den PhO-Faktor *aller* Systeme identisch festzulegen, so muss der PhO-Faktor ebenfalls in die Bewertung der Technologieanalyse aufgenommen werden. Gleichung (12-7) wird in diesem Fall um eine weitere Betrachtung erweitert.

In **Schritt III** werden die monetären Aufwendungen für die Systeme bilanziert. Hier fließen die Investitionen, die Recyclingkosten und evtl. unterschiedliche Betriebskosten (etwa Wartungskosten) ein. Die Energiekosten, resultierend aus der gewählten Laufvariable x , werden nur bilanziert, wenn sie unterschiedliche Auswirkungen auf die Life Cycle Costs haben. Beispielhaft sei hier auf die Analyse des Wärmeübertragers aus Kapitel 11 hingewiesen. Ein identischer PhO-Faktor sorgt für identische Betriebskosten der Systeme. Sollte jedoch z. B. eine Beleuchtungsanlage definiert werden, bei der die Beleuchtungsstärke als PhO-Faktor festgelegt wird, dann können unterschiedliche Technologien (Halogen, Leuchtstoffröhren, LED) zu unterschiedlichen Betriebskosten führen. Diese müssen in die Betrachtung mit eingebunden werden. Die Systemkosten werden nach Gleichung (12-1) aufgestellt. Hierbei handelt es sich um Gleichung (8-10) ohne den dynamischen Anteil:

$$C_0 C_{Tech(x)} = A_0(x) + \{K_{PEK} + K_{RSK} + K_{BSK}(x) + K_{RK} + K_{WK}\} \cdot n + K_{Recyc}(x) \quad (12-1)$$

Anschließend werden die Kosten der Systeme untereinander über den BwO-Faktor verglichen (**Schritt IV**). Hier ist lediglich eine Bilanzierung unter den vorhandenen Lösungen möglich. Dann handelt es sich bei der Lösung um ein lokales Optimum zwischen den Systemen. Somit wird das System mit den geringsten Kosten zum Betriebswirtschaftlichen Optimum der Technologieanalyse $C_0 C_{BwOTech}$:

$$F_{BwOTech} = \frac{C_0 C_{Tech}}{C_0 C_{BwOTech}} \quad (12-2)$$

In **Entwicklungsschritt V** werden die Umweltbelastungen bilanziert. Hier können neben den Treibhausgasemissionen auch andere Aspekte eingebunden werden. Den Ressourcenverbrauch bezieht man auf die notwendigen Aufwendungen zum Erreichen des vorgegebenen PhO-Faktors. Auch hier sind die Betriebsaufwendungen einzubeziehen, sofern sie signifikante Unterschiede aufweisen. Das lokale Optimum (**Schritt VI**) beschreibt man anhand von Gleichung (12-3):

$$CF_{Tech} = CF_{Herst} + CF_{Distr} + CF_{Betr} + CF_{Recyc} \quad (12-3)$$

Als weitere Ressourcenaufwendung, die hier beispielhaft eingebunden werden soll, wird der kumulierte Energieaufwand KEA über den kompletten Lebenszyklus betrachtet (**Schritt VII**):

$$KEA_{Tech} = KEA_{Herst} + KEA_{Distr} + KEA_{Betr} + KEA_{Recyc} \quad (12-4)$$

Die lokalen Faktoren werden nach den Gleichungen (11-5) und (11-6) bestimmt:

$$F_{CFO_{Tech}} = \frac{CF_{sys}}{CF_{min_{Tech}}} \quad (12-5)$$

$$F_{KEATech} = \frac{KEA_{sys}}{KEA_{minTech}} \quad (12-6)$$

Nachdem alle relevanten Kenndaten ermittelt worden, ist eine Zusammenführung der Ergebnisse notwendig (**Schritt VIII**). Durch eine gemeinsame Betrachtung lassen sich Systeme mit dem besten Kompromiss analysieren.

Die Anzahl der eingebundenen Faktoren wird in Gleichung (12-7) mit j beschrieben.

j = Anzahl der Einflussfaktoren

$$F_{ANTech} = \frac{\sum_{i=1}^j Abs(F_i - 1)}{j} + 1 \quad (12-7)$$

Aufgrund nachhaltiger Materialien oder Technologien kann es zu negativen Faktoren kommen. Aus diesem Grund werden die jeweiligen Faktoren in der entwickelten Gleichung (12-7) zuerst auf ihren Abstand zum Optimum (nämlich 1) bewertet und anschließend der Absolutwert ausgegeben. Über die Summe aller Einzelwerte kommt man zur Gesamtbewertung:

$$F_{ANTech,sys1} = \frac{Abs\{F_{BWO_{sys1}} - 1\}}{3} + \frac{Abs\{F_{CFO_{sys1}} - 1\}}{3} + \frac{Abs\{F_{KEA_{sys1}} - 1\}}{3} + 1$$

Das System mit der geringsten Abweichung von eins entspricht der besten Kompromisslösung nach den jeweiligen Faktoren, wenn die Faktoren gleich gewichtet werden.

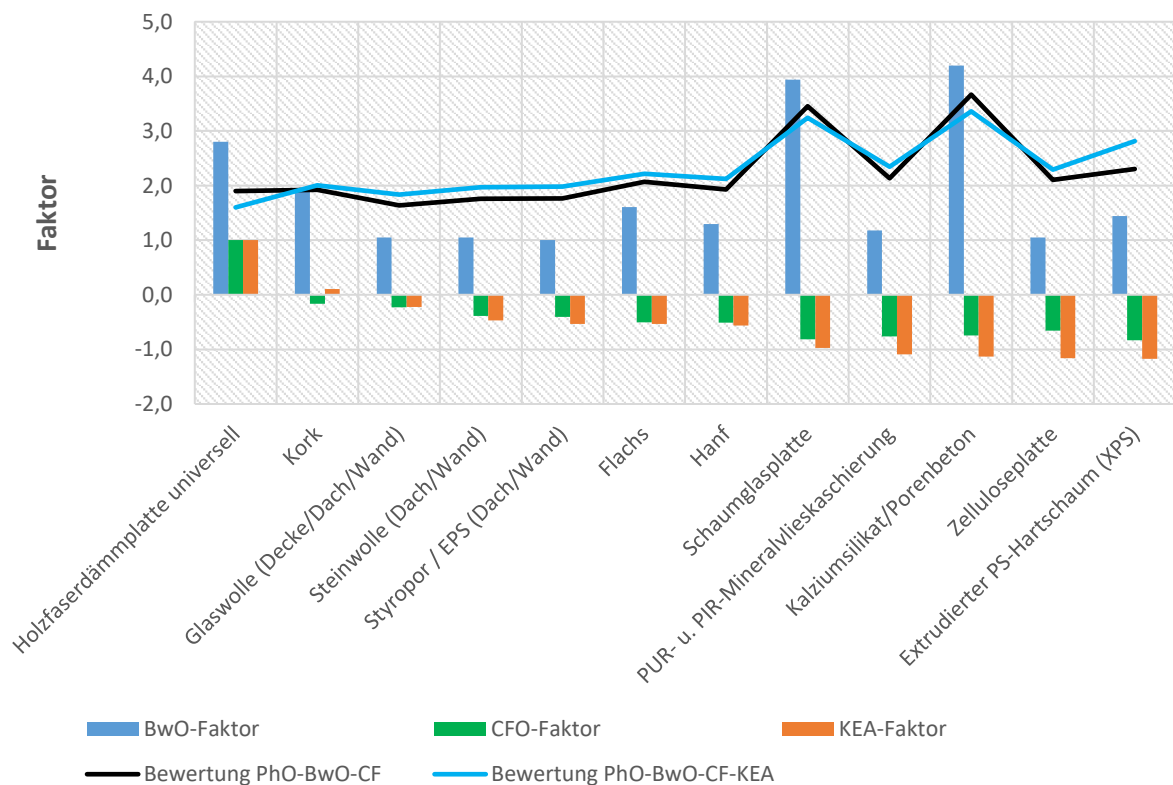


Abbildung 12-2: Auswertung einer Technologieanalyse

Abbildung 12-2 zeigt schematisch das Ergebnis einer Technologieanalyse am Beispiel einer Isolierung. Sollten die einzelnen Faktoren noch unterschiedliche Gewichtungen aufweisen, dann verändert sich Gleichung (12-7) zu folgender Gleichung:

$$F_{ANTech,g} = \frac{\sum_{i=1}^j Abs(F_i - 1) \cdot g_i}{g} + 1 \quad (12-8)$$

Dabei gibt g die Summe der einzelnen Gewichtungen an:

$$g = \sum_{i=1}^j g_i$$

$$g = 100 \%$$

Zur Berechnung des Kompromisspunktes zwischen dem BwO, CFO und dem KEA wird Gleichung (12-8) zu folgender Gleichung umgeformt:

$$F_{ANTech,g,sys i} = \frac{Abs\{F_{BwO_{sys i}} - 1\} \cdot g_{BwO}}{g} + \frac{Abs\{F_{CFO_{sys i}} - 1\} \cdot g_{CF}}{g} + \frac{Abs\{F_{KEA_{sys i}} - 1\} \cdot g_{KEA}}{g} + 1$$

Die Entscheidung über die jeweiligen Gewichtungen sollte begründet und dokumentiert werden, damit sie nachvollziehbar bleibt.

In **Schritt IX** wird das optimale System ausgewählt. Sollte die Technologieanalyse eine Unterschleife des kombinierten Anlagendesigns nach Kapitel 10 sein, dann wird anschließend mit der gewählten Technologie die optimale Konfiguration gewählt. Hierfür werden die Ergebnisse in den Anlagenkonfigurationen nach der Wechselwirkungsanalyse in den Schritt 3 eingebunden (Abbildung 10-1).

12.2 ERGEBNIS DER TECHNOLOGIEANALYSE

Die Technologieanalyse kann im Gegensatz zur Wechselwirkungsanalyse unabhängige Anlagen oder Systeme miteinander vergleichen und bewerten. Es ist keine kohärente Anlagenvariable für die unterschiedlichen Betrachtungen und Bilanzierungen notwendig. Die Technologieanalyse kann als Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse eingebunden werden oder als eigenständiges Bewertungstool unterschiedliche Anlagenprämissen in einer gemeinsamen Bewertung zusammenfügen. Allerdings beschränkt sich ihre Eignung auf die Systembewertung, hinsichtlich der Effektivität des Handelns. Will man eine Anlage unter dem Einfluss der Effizienz gestalten, greift man wieder auf die Wechselwirkungsanalyse (Kapitel 10) zurück.

In Kapitel 13 befindet sich eine ausführliche Beispielberechnung. In ihr konnte die Anlagenbewertung anhand verschiedenster Beurteilungskriterien über die Technologieanalyse gezeigt werden. Zusätzlich wurden in die entwickelten Gleichungen Gewichtungsfaktoren für eine individuelle Bewertung implementiert.

13 BEISPIEL EINER TECHNOLOGIEANALYSE

Die theoretische Beschreibung der Technologieanalyse aus Kapitel 12 soll mit einem praktischen Beispiel verdeutlicht werden. Als Beispiel wird eine Isoliermaterialanalyse für Gebäude gewählt. Obwohl dieses Beispiel lediglich den funktionellen Ablauf beschreibt und die Ergebnisse der Analyse zweitrangig sind, greift es ein energiepolitisch aktuelles Thema auf. Eine Stütze der Energiewende der deutschen Bundesregierung basiert auf der Reduktion des Primärenergiebedarfes von Wohngebäuden. Der Wärmebedarf im Wohngebäude-sektor ist verantwortlich für gut ein Drittel des inländischen Energieverbrauchs. Der Primärenergiebedarf von Gebäuden soll bis 2050 um 80 % gesenkt werden (siehe Abschnitt 2.2.2).

Die durchschnittliche Lebenserwartung für Wohngebäude liegt bei 40 Jahren. Aufgrund des hohen Energiebedarfs und der langen Lebensdauer sind Investitionen in ein effizientes Gebäude zu priorisieren. Der Fokus sollte aber nicht nur in der Energieeffizienz, sondern auch in der Ressourceneffizienz liegen. Bestehende Gebäude sollten daher saniert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Energie- und auf Ressourceneffizienz aus (Vermeidung von Neubauten). Eine funktionelle Isolierung, die in der Herstellung, Distribution und am Lebensende (EoL= End of Life) ökologisch verträglich ist, ist eine wesentliche Größe in diesem Konzept. Die Isolierung darf in den Phasen außerhalb der Nutzungszeit nicht mehr Energieaufwand und Umweltaufwendungen hervorrufen als in der Nutzungszeit eingespart werden kann. Der Mythos, der energetische Aufwand für die Produktion der Isolierung übersteige die Einsparungen während der Betriebsphase, hält sich bis heute in Teilen der Gesellschaft.

Becker hat dies in dem Bericht „Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau“ (2014) eindrucksvoll widerlegt und stellt fest:

„Die Sinnhaftigkeit der energetischen Gebäudesanierung sei durch einen plakativen Vergleich dargestellt: ein Einfamilienhaus mit 120 m² Grundfläche und durchschnittlichen Wärmedämmeigenschaften verbraucht zur Raumheizung jährlich ca. 1600 l Heizöl. Dabei würden bereits 40 Prozent des in einem Winter verheizten Erdöls ausreichen, um daraus eine 25 cm dicke Fassadendämmung aus Expandiertes Polystyrol (EPS) herzustellen und damit über Jahrzehnte den Heizölbedarf des Gebäudes drastisch zu reduzieren.“ [32]

Am EoL werden die Isoliermaterialien entweder thermisch verwertet oder deponiert. Ein Recycling erfolgt nur in den seltensten Fällen und nur für bestimmte Materialien. Im Sinne der Ressourceneffizienz ist somit eine langfristige Nutzung der Isolierung anzustreben. Des Weiteren sollten nachwachsende Materialien priorisiert werden, die während der Wachstumsphase CO₂ binden.

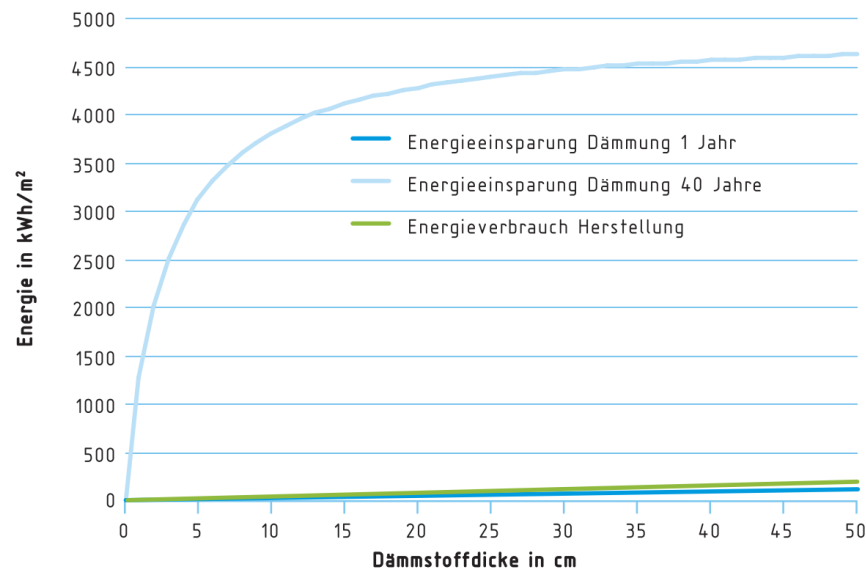


Abbildung 13-1: Energiebedarf in Abhängigkeit von der Isolierstärke [32]

Für die Bewertung der Umweltaufwendungen eignen sich die Umweltproduktdeklationen der jeweiligen Baumaterialien. Zu finden sind diese u.a. beim Institut *Bauen und Umwelt e.V.*

Grundlage der Umweltproduktdeklationen (EPD) ist die Norm DIN EN 15804 [33]. Sie soll für eine Vergleichbarkeit sorgen und gibt die Randbedingungen (z. B. Betrachtung cradle to grave) sowie die Bilanzgrenzen vor. Die Vergleichbarkeit stellt eine faire Entscheidungshilfe bei der Materialenauswahl dar und sorgt indirekt für Verbesserungsanreize bei den Herstellern. In der DIN EN 15804 werden lediglich die ökologischen Aspekte beurteilt, ökonomische und soziale Effekte bleiben unberücksichtigt.³⁵ Die DIN EN 15804 gründet auf der DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 und somit auf der Bilanzierung nach der Ökobilanz.

Für die Beispielanalysen wird eine spezifische Fläche von einem Quadratmeter betrachtet. Auf der Innenseite herrscht eine Temperatur von 20 Grad Celsius, und an der Außenseite liegt die Temperatur bei der normatmosphärischen Gefriergrenze von Wasser (bei einem Druck von 1013,25 hPa).

Der Ablauf der Technologieanalyse richtet sich nach Abbildung 12-1 und wird in einzelnen Schritten beschrieben.

Schritt I, Physikalische Wirk- und Verlustleistung übernehmen:

Der interne Energiebedarf auf der Innenseite stellt den physikalischen Optimalbedarf dar und wird gleichgesetzt mit dem Energiebedarf ohne Verluste des Wärmewürfels aus Kapitel 11. Aufstellen eines physikalischen Modells (Abbildung 13-2):

³⁵ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 15804; Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012 + A1:2013* (2014), S. 8

$$\dot{Q}_{innen} = \dot{Q}_{nutz} = \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) = 83,736 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{verle} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg})$$

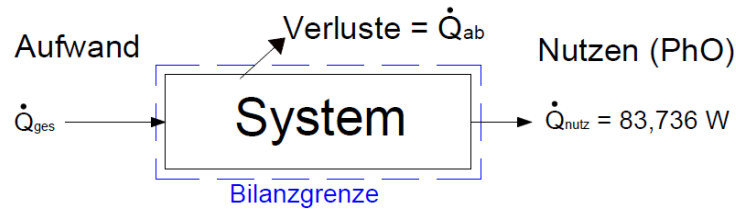


Abbildung 13-2: Bilanzgrenze Isolierung

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{nutz} + \dot{Q}_{ab}$$

Schritt II, Festlegen des PhO-Faktors:

Besteht die Möglichkeit, den PhO-Faktor für alle zu untersuchenden Komponenten oder Technologien einheitlich festzulegen, dann kann ein Verfahrensschritt in den kommenden Analysen eingespart werden. Ist dies jedoch nicht möglich, muss die Bewertung des Physikalischen Faktors für jedes System zusätzlich integriert werden.

Bei der Isolierungsanalyse wird der PhO-Faktor auf einen Wert von 1,036 festgelegt. Dieser Wert entspricht der dem Wärmedurchgangskoeffizienten U eines Gebäudes nach Passivhausstandard (siehe Tabelle 13-1).

Tabelle 13-1: Daten für die Technologieanalyse

Analyse F-PhO			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
Massenstrom	\dot{m}	0,001	kg/s
Wärmekapazität	c_p	4186,8	J/kgK
Optimale Verbrauchsleistung	\dot{V}_{PhO}^B	83,736	W
PhO-Faktor inkl. Isolierung	f_{PhO}	1,036	
Verlustleistung	\dot{V}_{verl}^B	3	W
Temperaturunterschied	$\Delta T_{Außen-Innen}$	20	K
Wärmedurchgangskoeffizient, Passivhausstandard	U	0,15	W/m²K

Schritte III und IV, Analyse der Kosten für die Investition und das Recycling:

Die Kosten für die jeweiligen Isoliermaterialien stammen aus [34] und sind unter Vorbehalt als Mittelwerte angesetzt. Berechnet wurden die Investitionskosten für spezifischen Volumenwerten. Diese werden in die weiteren Berechnungen eingebunden.

Aufgrund mangelnder Informationsquellen sind die Recyclingkosten in den kommenden Analysen unberücksichtigt geblieben. Die Recyclingkosten sind stark von lokalen Konditionen abhängig, und ihre künftige Entwicklung lässt sich nur mit großer Unsicherheit prognostizieren.

Die Betriebsstoffkosten können unberücksichtigt bleiben. Dies resultiert aus dem einheitlichen PhO-Faktor der Bilanzierung. Alle Betriebskosten sind als identisch zu deklarieren. Sollten die unterschiedlichen Isoliermaterialien jedoch unterschiedliche Wartungs- und Instandhaltungskosten aufweisen, dann wären diese zu berücksichtigen.

$$C_0 C_{Tech(x)} = A_0(x) + \{K_{PEK} + K_{RSK} + K_{BSK(x)} + K_{RK} + K_{WK}\} \cdot n + K_{Recyc(x)}$$

= identisch = 0

$$F_{BwO_{Tech}} = \frac{C_0 C_{Tech}}{C_0 C_{BwO_{Tech}}}$$

In Tabelle 13-2 wurden die notwendigen Isolationsstärken angegeben, um den vorgegebenen PhO-Faktor aus Tabelle 13-1 zu erreichen. Die jeweiligen Kosten für die Fläche von einem Quadratmeter resultieren aus dem spezifischen Grundpreis pro Kubikmeter (Spalte 3) und der Isolationsstärke (Spalte 4).

Bei einer reinen Kostenbetrachtung wäre eine Isolierung mit Styropor zu wählen. Die preisgünstigste Isoliervariante stellt auch den lokalen Punkt des Betriebswirtschaftlichen Optimums.

Tabelle 13-2: Kostenübersicht Isolierstoffe³⁶

Dämmmaterialien	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m K]	Spezifischer Grundpreis [€/m³]	Notwendige Isolationsstärke PhO-Faktor [m]	Isolationskosten [€/m²]	BwO-Faktor Isolierung
Holzfaserdämmplatte universell	0,040	250,00	0,267	66,67	2,80
Kork	0,050	138,89	0,333	46,30	1,94
Glaswolle(Decke/Dach/Wand)	0,035	107,14	0,233	25,00	1,05
Steinwolle (Dach/Wand)	0,035	107,14	0,233	25,00	1,05
Styropor / EPS (Dach/Wand)	0,040	89,29	0,267	23,81	1,00
Flachs	0,040	143,33	0,267	38,22	1,61
Hanf	0,040	115,63	0,267	30,83	1,30
Schaumglasplatte	0,045	312,50	0,300	93,75	3,94
PUR- u. PIR-Mineralvlieskaschierung	0,028	150,00	0,187	28,00	1,18
Kalziumsilikat/Porenbeton	0,045	333,33	0,300	100,00	4,20
Zelluloseplatte	0,040	93,75	0,267	25,00	1,05
Extrudierter PS-Hartschaum (XPS)	0,030	171,43	0,200	34,29	1,44
Minimum	0,030	89,29	0,190	23,81	1,00
Maximum	0,050	333,33	0,330	100,00	4,20
Mittelwert	0,040	167,70	0,260	44,74	1,88

Schritte V bis VII, CF und KEA für die Isolierungen analysieren:

Informationen über die ökologischen Aufwendungen entstammen den EPDs, der VDI 4600 [35] und dem Bericht „Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau“ von Becker 2014 [32].

³⁶ Vgl. Günther, S. (2016)

Wieder werden die jeweiligen Werte spezifisch auf einen Kubikmeter bezogen. Die anschließende Bewertung bezieht sich auf das Optimum von CF und KEA.

$$CF_{sysTech} = CF_{Herst} + CF_{Distr} + CF_{Betr} + CF_{Recyc}$$

$$F_{CFTech} = \frac{CF_{sys}}{CF_{minTech}}$$

$$KEA_{sysTech} = KEA_{Herst} + KEA_{Distr} + KEA_{Betr} + KEA_{Recyc}$$

$$F_{KEATech} = \frac{KEA_{sys}}{KEA_{minTech}}$$

Tabelle 13-3: Ökologische Bewertung Isolierung

Dämmmaterialien	Spezifischer nicht nachhaltiger Energiebedarf Herstellung/Entsorgung [MJ/m³]	Spezifische CO ₂ -äq. Emissionen Herstellung/Entsorgung [CO ₂ -äq. kg/m³]	Nicht nachhaltiger Energiebedarf Herstellung/Entsorgung [MJ/m²]	CO ₂ -äq. Emissionen Herstellung/Entsorgung [CO ₂ -äq. kg/m²]	Faktor KEA	Faktor CFO
Holzfaserdämmplatte universell	-2138,00	-128,00	-570,13	-34,13	1	1
Kork	286,07	-10,71	95,36	-3,57	-0,167	0,105
Glaswolle (Decke/Dach/Wand)	554,09	32,73	129,29	7,64	-0,227	-0,224
Steinwolle (Dach/Wand)	945,45	68,64	220,61	16,02	-0,387	-0,469
Styropor/EPS (Dach/Wand)	865,20	68,00	230,72	18,13	-0,405	-0,531
Flachs	1084,40	68,00	289,17	18,13	-0,507	-0,531
Hanf	1088,00	72,00	290,13	19,20	-0,509	-0,563
Schaumglasplatte	1548,21	110,71	464,46	33,21	-0,815	-0,973
PUR- u. PIR-Mineralvlieskaschierung	2322,35	200,00	433,51	37,33	-0,760	-1,094
Kalziumsilikat/Porenbeton	1417,86	128,57	425,36	38,57	-0,746	-1,130
Zelluloseplatte	1405,70	148,48	374,85	39,59	-0,657	-1,160
Extrudierter PS-Hartschaum (XPS)	2371,05	200,00	474,21	40,00	-0,831	-1,172
Minimum	-2138,00	-128,00	-570,13	-34,13	-0,830	-1,170
Maximum	2371,05	200,00	474,21	40,00	1,000	1,000
Mittelwert	979,20	79,87	238,13	19,18	-0,420	-0,560

Das Isoliermaterial „Holzfaserdämmplatte universell“ erfordert eine Isolationsstärke von 267 mm und schneidet in der ökologischen Bewertung am besten ab. Der nicht nachhaltige Energiebedarf ist negativ, ebenfalls die Treibhausgasbelastungen (Tabelle 13-3). Diese öko-

logisch wertvollen Eigenschaften resultieren aus der nachhaltigen Energie- und Kohlendioxidspeicherung während der Wachstumsphase des Holzes. Bei der thermischen Verwertung am Einsatzende (EoL) werden die Treibhausgase und die gespeicherte Energie wieder freigesetzt. Trotzdem lässt sich durch die thermische Verwertung ein nicht nachhaltiger Energieeinsatz vermeiden, was zu einer positiven Bilanz führt.

Am schlechtesten schneidet das Isolationsmaterial XPS (Hartschaumplatten aus Polystyrolextruderschaum) ab. Es hat den größten Abstand zum optimalen Faktor des kumulierten Energieeinsatzes mit einer Differenz von 1,832. Es ist darauf hinzuweisen, dass immer die Distanz zu eins eine Wertigkeit angibt.

Schritt VIII, Kompromissanalyse:

Nachdem alle relevanten Kenndaten ermittelt wurden, ist eine Zusammenführung der Ergebnisse notwendig. Durch eine gemeinsame Betrachtung können Systeme mit dem besten Kompromiss analysiert werden.

Die Anzahl der eingebundenen Faktoren wird in Gleichung (12-7) mit j beschrieben:

$$j = \text{Anzahl der Einflussfaktoren}$$

$$F_{ANTech} = \frac{\sum_{i=1}^j Abs(F_i - 1)}{j} + 1$$

$$F_{ANTech,sys i} = \frac{Abs\{F_{BWO_{sys i}} - 1\}}{3} + \frac{Abs\{F_{CFO_{sys i}} - 1\}}{3} + \frac{Abs\{F_{KEA_{sys i}} - 1\}}{3} + 1$$

Nach der beschriebenen Gleichung wurden die einzelnen Isolationsmaterialien bewertet. Das Material mit der geringsten Abweichung von eins bietet den besten Kompromiss. Wird nur die Wechselwirkung zwischen dem BwO und dem CFO bei feststehendem PhO bewertet, dann schneidet die Glaswolle am besten ab (Abbildung 13-3). Bei einer Hinzunahme des KEA bietet die Holzfaserdämmplatte, durch die Reduktion der nicht nachhaltigen Energie, die beste Bilanz (Tabelle 13-4). Eine grafische Auswertung und Gegenüberstellung befindet sich in Abbildung 13-3.

Eine Erweiterung ermöglicht die individuelle Gewichtung der Einflussfaktoren nach Gleichung (12-8). In Tabelle 13-5 sind die Gewichtungsfaktoren eingetragen, die Summe der Faktoren muss eins ergeben.

Tabelle 13-4: Lineare Auswertung

Dämmmaterialien	Lineare Gewichtung BwO-CFO	Lineare Gewichtung BwO-CFO-KEA
Holzfaserdämmplatte universell	1,90	1,60
Kork	1,92	2,00
Glaswolle (Decke/Dach/Wand)	1,64	1,83
Steinwolle (Dach/Wand)	1,76	1,97
Styropor/ EPS (Dach/ Wand)	1,77	1,98
Flachs	2,07	2,21
Hanf	1,93	2,12
Schaumglasplatte	3,46	3,24
PUR- u. PIR-Mineralvlieskaschierung	2,13	2,34
Kalziumsilikat/Porenbeton	3,67	3,36
Zelluloseplatte	2,10	2,29
Extrudierter PS-Hartschaum (XPS)	2,31	2,81
Minimum	1,64	1,60
Maximum	3,67	3,36
Mittelwert	2,22	2,31

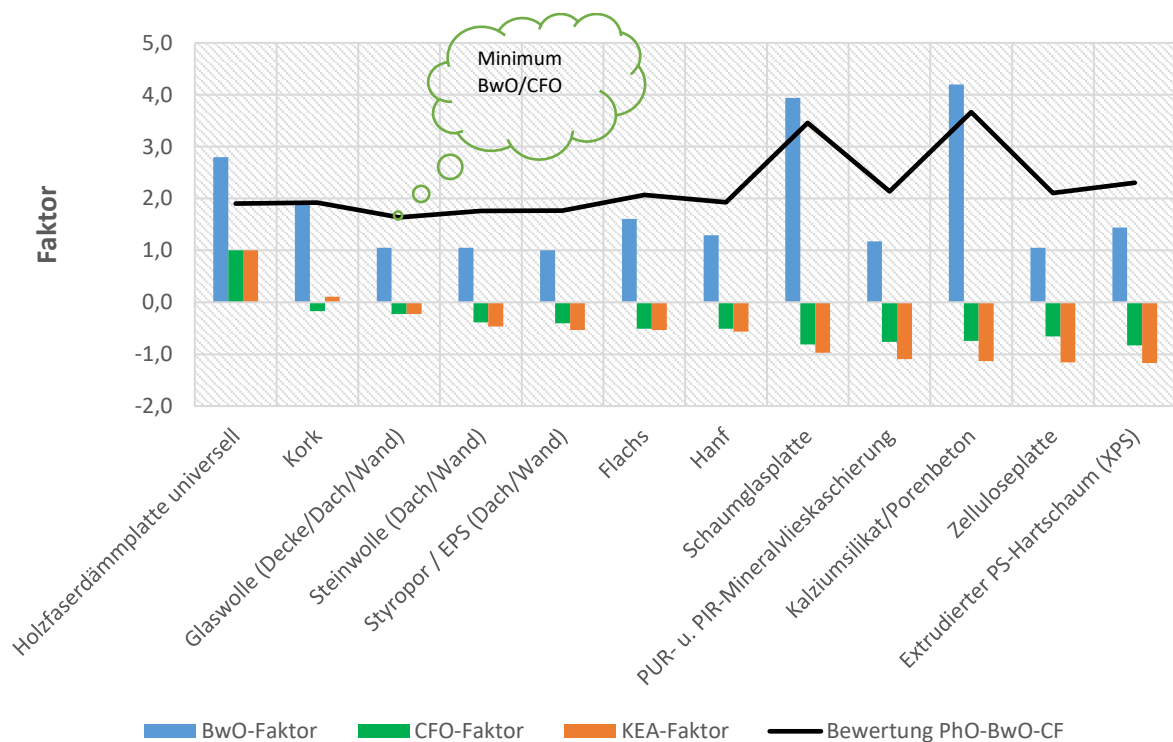


Abbildung 13-3: Ergebnis lineare Isoliermaterialbewertung Technologieanalyse

Tabelle 13-5: Gewichtungsfaktoren

Gewichtung BwO	20 %
Gewichtung CF	40 %
Gewichtung KEA	40 %

Die Ergebnisse sind in Tabelle 13-6 und die grafische Auswertung befindet sich in Abbildung 13-4 dokumentiert. Interessant ist die Veränderung durch die einzelnen Gewichtungen auf das Gesamtergebnis des jeweiligen Materials. Obwohl die ökonomischen Aspekte an Gewicht gewonnen haben, sinkt die Abweichung z. B. von der Schaumglasplatte. Das Ergebnis wirkt im ersten Moment paradox, betrachtet man jedoch die hohen Anschaffungskosten und die sinkende Bedeutung der Ökonomie, erklärt sich das Verhalten. Die überraschend schlechte Bewertung der ökologischen, relativ preiswerten Isolationsmaterialien Hanf und Flachs ist dem hohen Energieaufwand beim Trocknen geschuldet.

Tabelle 13-6: Ergebnis gewichtet

Dämmmaterialien	Gewichtete Bewertung BwO-CFO-KEA
Holzfaserdämmplatte universell	1,36
Kork	2,01
Glaswolle (Decke/Dach/Wand)	1,99
Steinwolle (Dach/Wand)	2,15
Styropor EPS (Dach/Wand)	2,17
Flachs	2,34
Hanf	2,29
Schaumglasplatte	3,10
PUR- u. PIR-Mineralvlieskaschierung	2,58
Kalziumsilikat/Porenbeton	3,19
Zelluloseplatte	2,54
Extrudierter PS-Hartschaum (XPS)	2,69

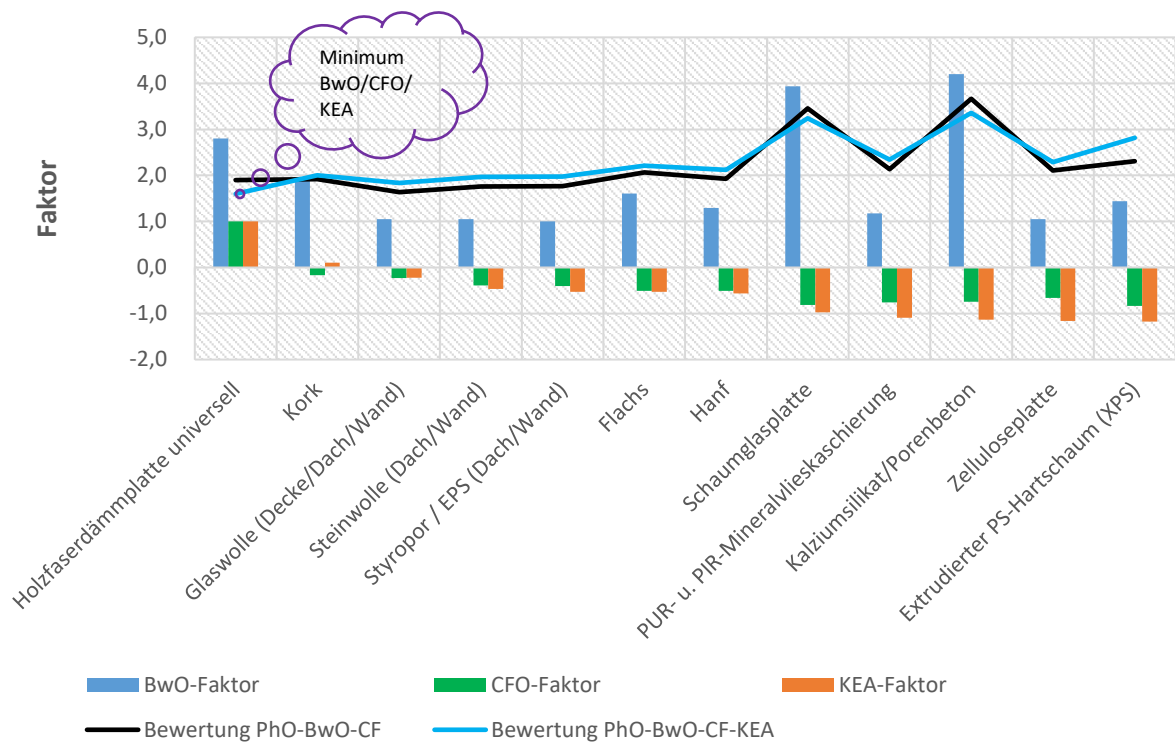


Abbildung 13-4: Vergleich Isoliermaterialien mit gewichteter Bewertung

14 OPTIMALER WARTUNGSZEITPUNKT

Ein technisches System unterliegt betriebsbedingten Verschmutzungen und/oder Verschleiß. Diese Effekte können für eine Abweichung vom konzeptionierten Operationspunkt der Anlage sorgen.

Zu Abnutzungen in einem System kann es aufgrund von zwei unterschiedlichen Ursachen kommen. Die erste Form der Abnutzung kann auf natürlichem Wege entstehen, z. B. durch den Einsatz von abrasiven Stoffen. Zu unnatürlichen Abnutzungen kommt es in Anlagen durch eine falsche Betriebsführung, z. B. durch eine falsche Auslastung.³⁷

Nach den bereits eingeführten Faktoren PhO, BwO und CFO sollen diese Abweichungen analysiert und die jeweiligen Optima sowie ein gemeinsames Optimum für den Zeitpunkt einer Wartung bzw. Instandsetzung definiert werden. Die unterschiedlichen Definitionen für eine Wartung und eine Instandsetzung sind in der DIN 31051 beschrieben. Bei einer Wartung geht es um die Bewahrung des Sollzustandes zur Vermeidung von Störungen. Das Ziel der Instandhaltung ist identisch, jedoch kommen weitere Maßnahmen wie Erneuerung oder Aufarbeitung von einzelnen Komponenten hinzu. Bei einer Inspektion wird lediglich der Zustand der Anlage oder des Bauteils analysiert.³⁸

Vorbeugende Wartungen werden nach einem festgelegten Zeitraum oder einer Produktionsmenge durchgeführt. Hierdurch sollen Störungen des Anlagenbetriebs verhindert werden. Ebenfalls hilft eine vorbeugende Wartung, die Produktionsqualitäten über längere Produktionszeiten aufrecht zu erhalten. Somit werden zusammengefasst die Anlagenzuverlässigkeit und die Qualität gesteigert sowie Kosten eingespart. Des Weiteren sind vorbeugende Maßnahmen planbar, eventuell benötigte Komponenten für eine Wartung können vorher organisiert werden, was die Anlagenstillstandzeit verringert. Bei einer größeren Anlage sollten Wartungsarbeiten verschiedener Systeme kombiniert werden, dadurch können die Stillstandzeiten in der Summe reduziert werden. Viele Unternehmen bündeln ihre Anlagenwartungen in einem Zeitraum, um die Verfügbarkeit der Anlagen für die Produktion zu maximieren.

14.1 OPTIMALER WARTUNGSZEITPUNKT NACH DEM BWO

Nicht nur die steigende Ineffizienz einer Anlage durch Abnutzung sorgt für die Notwendigkeit von regelmäßigen Wartungen, sondern auch das Bedürfnis, ausfallbedingte Instandhaltungen mit den daraus resultierenden hohen Ausfallkosten zu vermeiden. Eine unplanmäßige Instandhaltung stoppt im Extremfall die komplette Produktion, wodurch es zu immensen wirtschaftlichen Schäden kommen kann. Daher dienen vorbeugende Wartungen auch zur Vermeidung von unplanmäßigen Instandhaltungen. Diese Art der Prophylaxe ist monetär nur sehr schwer zu beurteilen. Im ersten Moment sind vorbeugende

³⁷ Vgl. Kruft, A., et al. (2013), S. 607

³⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 31051* (2012)

Wartungen/Instandhaltungen lediglich mit Kosten verbunden. Eine optimal durchgeführte Wartung oder Instandhaltung senkt jedoch die Produktions- bzw. Prozesskosten, erhöht Produktivität und Auslastung der Anlagen und sichert ihre Funktionalität.

„Eine geplante Instandhaltung ist immer eine Zukunftsinvestition, die mit zunehmendem Automatisierungsgrad der Fertigung immer mehr an Bedeutung gewinnt.“ [36]

Kernelemente moderner Wartungs- und Instandhaltungsstrategien sind die:

- Systematische Planung der Maschinen- und Anlagenstillstände
- Vermeidung unvorhergesehener Stillstände
- Vermeidung von Personen- oder Sachschäden

Bei einer monetären Bewertung werden neben den tatsächlichen Aufwendungen für die Wartung oder Instandsetzung (Gleichung (14-1)), auch die Aufwendungen für den Produktionsausfall berücksichtigt (Bestandteil der Opportunitätskosten). Dort werden die Kosten für Wartungen und Instandhaltungen zusammengefasst unter dem Symbol K_W :

$$K_{W_{ges}} = K_W + K_{PA} \quad (14-1)$$

Dabei hängen die Wartungskosten, bestehend aus den tatsächlichen Wartungskosten und den Ausfallkosten, in der Regel von der Zeit ab. Eine geplante und gut vorbereitete Wartung sorgt für geringere Ausfallzeiten und somit geringere Kosten.

Der optimale Wartungszeitpunkt wird bestimmt über die Summe der Betriebsstoffkosten seit der letzten Inspektion, inklusive einer Verschmutzung der Anlage oder Verschlechterung des Wirkungsgrades im Verhältnis zu den Betriebsstoffkosten ohne Veränderung des Systemzustandes (Gleichung (14-2)). Die Wartung wird fällig, sobald die Differenzkosten den gesamten Wartungskosten entsprechen. Die realen Betriebsstoffkosten mit einer zeitabhängigen Verschlechterung werden als $K_{BSK_{real}}$ bezeichnet. Die Aufwendungen ohne eine Veränderung werden definiert als $K_{BSK_{BwO}}$. Sie geben das Betriebswirtschaftliche Optimum für die vorhandene Anlagenkonfiguration an. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei nicht um die optimalen Kosten nach der Anlagenkonfiguration aus Kapitel 10 handeln muss. Diese Betrachtung befasst sich mit einer feststehenden Konfiguration, deren Konzeption in der Vergangenheit getätigt wurde. Diese ist unveränderbar, und das Optimum liegt in der Betriebsweise mit dem geringsten Betriebsstoffbedarf nach der derzeitigen Anlagengestaltung.

Werden die Wartungsintervalle nach dem Verfahren des BwO festgelegt, bezeichnet man die realen optimierten Betriebskosten inklusive der Wartungskosten als $K_{BSK_{opt}}$:

$$K_{BSK_{real}(t_{W,0}-t_W)} - K_{BSK_{BwO}(t_{W,0}-t_W)} \geq K_{WK_{ges}} \quad (14-2)$$

Dabei sind die Betriebsstoffkosten zeitabhängige Variablen:

$$K_{WK_{ges}} = \int_{t_{W_0}}^{t_W} [K_{BSK_{real}} - K_{BSK_{BwO}}] (dt) \quad (14-3)$$

Um den optimalen Zeitpunkt für die Wartung zu bestimmen, werden die Kosten der Wartung mit den Mehrkosten der Ineffizienz gleichgesetzt (Gleichung (14-3)). Anschließend wird das Integral aufgelöst und die Gleichung nach dem Wartungszeitpunkt aufgelöst:

$$K_{WK_{ges}} = \frac{1}{2} \left[\{K_{BSK_{real}} - K_{BSK_{BwO}}\} \cdot t_W^2 - \{K_{BSK_{real}} - K_{kBSK_{BwO}}\} \cdot t_{W_0}^2 \right]$$

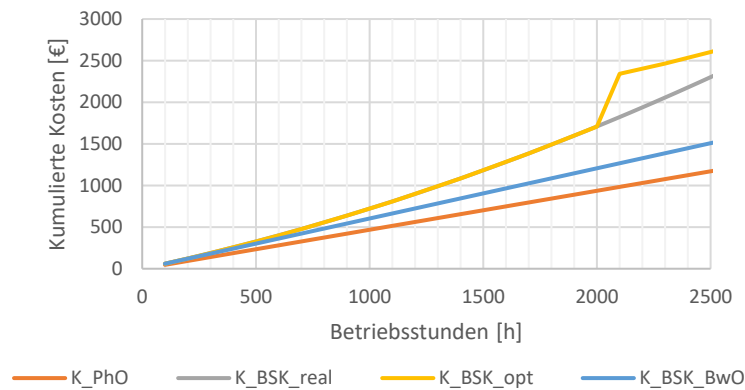


Abbildung 14-1: Ökonomische Wartungszeitpunktanalyse, kumulierter Kostenverlauf (2500 h)

Für die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Wartungen kann die Zeit t_{W_0} gleich null gesetzt werden. Gleichung (14-4) wird gebildet aus dem hergeleiteten und aufgelösten Integral:

$$\Delta t_{BwO_W} = \sqrt{\frac{2 \cdot K_{WK_{ges}}}{\{K_{BSK_{real}} - K_{BSK_{BwO}}\}}} \quad (14-4)$$

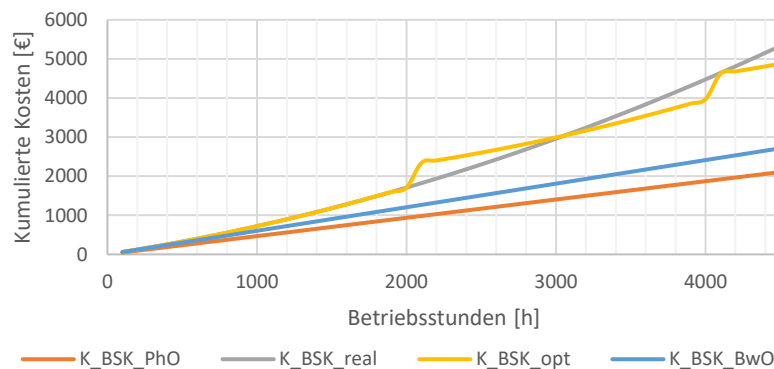


Abbildung 14-2: Ökonomische Wartungszeitpunktanalyse, kumulierter Kostenverlauf (4500 h)

Somit kann die Instandhaltungsplanung zeitabhängig durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass sich die Wartungen ökonomisch erst ab dem zweiten Wartungsdurchlauf positiv bemerkbar machen (Abbildung 14-2). Dies liegt an den zusätzlichen Aufwendungen für

die Wartung. Wird eine Wartungsperiode ermittelt, die nicht kleiner als die Hälfte der Betriebslaufzeit ist, muss die zusätzliche Aufwendung durch die Wartung kritisch geprüft werden.

14.2 OPTIMALER WARTUNGSZEITPUNKT NACH DEM CFO

Analog zu den betriebswirtschaftlichen Ermittlungen kann der Wartungszeitpunkt in Bezug auf den optimalen Treibhausgasaufwand bestimmt werden. Die Umweltaufwendung durch die zeitlich ansteigende Ineffizienz muss gleich der Umweltaufwendung durch die Wartung sein. Ist dieser Zustand erfüllt, erreicht eine Wartung nach dem CFO seine Berechtigung:

$$CF_W = \int_{t_{W,0}}^{t_W} [CF_{real} - CF_{BwO}] (dt) \quad (14-5)$$

Der Zeitpunkt lässt sich nach der Gleichung (14-6) berechnen. Diese Gleichung ergibt sich aus dem aufgelösten Integral in Gleichung (14-5), wenn der Wartungszeitpunkt $t_{W,0} = 0$ ist:

$$\Delta t_{CFO_W} = \sqrt{\frac{2 \cdot CF_W}{\{CF_{real} - CF_{BwO}\}}} \quad (14-6)$$

14.3 OPTIMALER WARTUNGSZEITPUNKT NACH DEM PHO

Wartungen nach dem PhO-Faktor sind zu bevorzugen, sobald sich der PhO-Faktor der Anlage von seinem Startwert entfernt. Folglich ist bei einer sich kontinuierlich abnutzen oder verdreckenden Anlage der Wartungszeitpunkt in einem infinitesimal kleinen Zeitabstand nach dem Anlagenstart erreicht.

Eine zeitliche Wartungsdefinition über den PhO-Faktor kann somit nicht empfohlen werden, allerdings kann der PhO-Differenzleistungsfaktor einen Kennwert für die zeitunabhängige Wartungszeitpunktanalyse liefern, was einen großen Vorteil für vorbeugende Instandhaltungen bedeutet. In Kombination mit der Wartungszeitpunktdefinition über das BwO wird der PhO-Differenzleistungsfaktor für den Zeitpunkt der optimalen Wartung nach dem BwO berechnet. Ist eine ausreichende Messtechnik vorhanden, dann kann diese in regelmäßigen Intervallen ausgewertet werden. Der gemessene Leistungsfaktor wird mit dem Leistungsfaktor aus der BwO-Analyse verglichen, somit kann eine zeitunabhängige Wartung detektiert werden. Des Weiteren ist es möglich, eine Vorbereitungszeit für die Wartungen in die Analyse einzubeziehen, was einen weiteren Vorteil aufwirft.

Aus dem Ergebnis der Zeitpunktanalyse für eine betriebswirtschaftlich optimale Wartung (Zeitpunkt t_w) wird der PhO-Faktor der Anlage berechnet:

$$f_{PhO_w} = \frac{\dot{V}_{tw}^B}{\dot{V}_{PhO_{BwO}}^B} \quad (14-7)$$

Durch eine angemessene Wartungsvorbereitungszeit (WVZ) ließen sich Effizienz und Sicherheit deutlich steigern. Eine Hysterese könnte für eine sinnvolle Wartungsvorbereitungszeit ausgelegt werden (Gleichung (14-8)):

$$F_{PhO_w, WVZ} = \frac{V_{tw-WVZ}^B}{V_{PhO}^B} \quad (14-8)$$

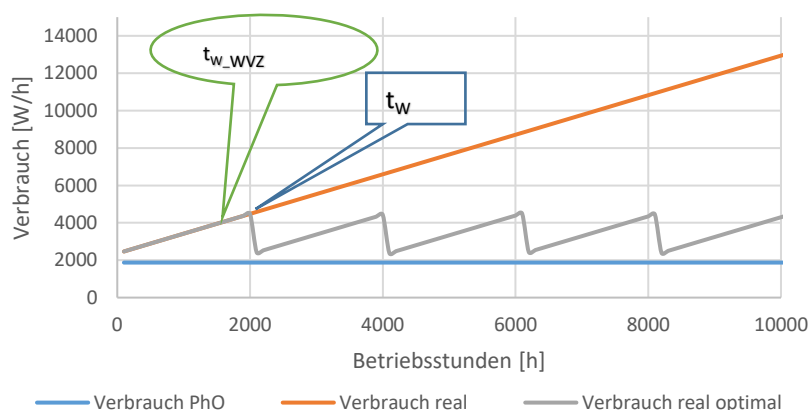


Abbildung 14-3: Wartungszeitpunkt-Monitoring

Abbildung 14-3 zeigt die unterschiedlichen Wartungszeitpunktmeldungen für ein Anlagen-Monitoring. Der direkte Wartungszeitpunkt wird mit t_w und die vorzeitige Meldung mit $t_{w, WVZ}$ beschrieben. Ein Beispiel für die Wartungsberechnung befindet sich im Anhang Kapitel IV.

14.4 ERGEBNIS DER WARTUNGSZEITPUNKTANALYSE

In Kapitel 14 wurden ökonomische und ökologische Möglichkeiten für eine Definition des optimalen Wartungszeitpunktes gezeigt. Somit kann man vorbeugende Anlageninstandhaltungen ex ante bestimmen.

Des Weiteren wurde über das Physikalische Optimum ein Leistungsbewertungsverfahren entwickelt, das über ein Anlagen-Monitoring zeitunabhängige Wartungen nach ökologischen oder ökonomischen Prämissen ermöglicht.

Ein Beispiel für die Wartungszeitpunktanalyse über die entwickelten Gleichungen, inklusive ausführlicher Berechnung, befindet sich im Anhang Kapitel IV.

15 ERSATZPROBLEM

Im Laufe der Betriebsjahre muss ein Unternehmen sein Inventar überprüfen und entscheiden, ob die Anlage weiter betrieben werden soll oder ob es in eine neuere, effizientere Anlagentechnik reinvestiert. Die Unternehmen bewerten dazu neben der Wirtschaftlichkeit auch sekundäre Einflussfaktoren, die häufig nicht in monetären Einheiten angegeben werden können. Ein Beispiel könnte ein Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz sein. Weitere Einflussfaktoren wie evtl. nötige Schulungen der Mitarbeiter in der neuen Anlagentechnik könnten ebenfalls eine Rolle spielen. In den kommenden Analysen sind nur die direkt geldwerten Einheiten berücksichtigt.

Für die Ersatzwertberechnung stehen die unterschiedlichen Investitionsrechnungen aus Abschnitt 3.3 zur Verfügung. Die statischen Investitionsrechnungen werden mit den entwickelten Allokationsfaktoren für die Teuerung und die Verzinsung erweitert. Dadurch wandelt sich die statische zu einer dynamischen Investitionsrechnung. Im Anhang Kapitel IV befindet sich eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Verfahren. Demnach führt die dynamische Erweiterung zu einer Äquivalenz unter den Investitionsrechnungen. Somit beschreibt *eine* Gleichung basierend auf der Kapitalwertmethode alle übrigen Investitionsrechnungsverfahren.

15.1 BEURTEILUNG DER KAPITALWERTMETHODE

Die Kapitalwertmethode wurde in Abschnitt 3.3.5 ausführlich beschrieben und soll hier genutzt werden, um eine Neuinvestition unter betriebswirtschaftlicher Sicht zu bestätigen.

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{(e_t - a_t)}{(1+i)^t} \right] + L_n \cdot (1+i)^{-n}$$

Es handelt sich um eine dynamische Betrachtung unter Einbezug der unterschiedlichen Zeitwerte. Hier werden die in Abschnitt 8.4 entwickelten Faktoren für eine Vereinfachung der Gleichung herangezogen:

$$C_0 = -A_0 + \{e_t - K_{OK} \cdot TZ_{Faktor}\} \cdot n \cdot Z_{Faktor} + L_n \cdot Z_{Faktor}$$

Werden jetzt noch die kalkulatorischen Zinsen hinzuaddiert ergibt sich die Gleichung:

$$C_0 = -A_0 + \left\{ e_t - K_{OK} \cdot TZ_{Faktor} - \left[\frac{A_0 - L_n}{2} \right] \cdot i \right\} \cdot n \cdot Z_{Faktor} + L_n \cdot Z_{Faktor}$$

Die Bestandsanlage bekommt das Kürzel B, und die Neuanlage wird mit dem Index N versehen. Wird die Zeit analysiert, an der beide Anlagen indifferent zueinander sind, dann ergibt sich Gleichung (15-1). Anschließend werden die Terme für die Bestands- und Neuanlage eingesetzt und nach dem Zeitpunkt der Indifferenz aufgelöst (Gleichung (15-2)). Soll die Analyse über den PhO-Differenzleistungsfaktor beschrieben werden, dann wird Gleichung (15-3) genutzt:

$$C_{0B} = C_{0N} \quad (15-1)$$

$$n_{KWM_{min}} = \frac{\frac{A_{0N} - A_{0B}}{Z} + L_{nB} - L_{nN}}{\left[e_N - e_B + (K_{OK_B} - K_{OK_N}) \cdot TZ + (A_{0B} - A_{0N} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot \frac{i}{2} \right]} \quad (15-2)$$

$$\Delta F_{PhO, KWM_{min}} = \frac{\frac{A_{0N} - A_{0B}}{Z} + L_{nB} - L_{nN}}{n_{LCC} \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{K_{fN} - K_{fB}}{V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{e_B - e_N}{TZ \cdot k_{el} \cdot V_{PhO}^B} + \frac{(A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot i}{2 \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} \quad (15-3)$$

Die Ersatzwertanalyse über die Gewinnvergleichsrechnung (Anhang Kapitel IV) und die Kapitalwertmethode unterscheiden sich nur noch in dem Zinsfaktor und somit in der periodischen Betrachtung.

Wird die in dieser Arbeit aus dem abgewandelten Kapitalwert entwickelte Gleichung (8-10) für eine Ersatzanalyse angesetzt, dann ergibt sich hier der direkte Zusammenhang zur Kostenvergleichsrechnung (Gleichungen (15-6) und (15-5)). Der Restwert aus der Investitionsrechnung kann gleichgesetzt werden mit den Recyclingkosten, lediglich das Vorzeichen muss beachtet werden. Ein Recycling weist in der Regel einen negativen Restwert auf.

$$n_{BWO_{min}} = \frac{\frac{A_{0N} - A_{0B}}{Z} + L_{nB} - L_{nN}}{\left[(K_{OK_B} - K_{OK_N}) \cdot TZ + (A_{0B} - A_{0N} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot \frac{i}{2} \right]} \quad (15-4)$$

$$\Delta F_{PhO, BWO_{min}} = \frac{\frac{A_{0N} - A_{0B}}{Z} + L_{nB} - L_{nN}}{n_{LCC} \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{K_{fN} - K_{fB}}{V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{(A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot i}{2 \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} \quad (15-5)$$

Der PhO-Differenzfaktor ist gleich dem PhO-Differenzleistungsfaktor:

$$\Delta F_{PhO} = \Delta f_{PhO}$$

Die Analyse der dynamischen Investitionsrechnungen zeigt, dass sich die statischen und die dynamischen Gleichungen lediglich durch die Abzinsung der zukünftigen Zeitperioden unterscheiden. Daher können im Allgemeinen die Gleichungen aus der Kapitalwertanalyse angewendet werden. Sollte es sich um eine statische Analyse handeln, dann können die dynamischen Faktoren einfach auf eins gesetzt werden, und die Gleichungen behalten ihre Gültigkeit. Für die Ermittlung der Mindestrestbetriebslaufzeit finden Gleichung (15-2) und für die notwendige PhO-Faktordifferenz Gleichung (15-3) ihre Gültigkeit.

15.2 ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNG EINES ERSATZPROBLEMS

Die ökonomische Betrachtung des Ersatzproblems ist einheitlich für jede Anlage durchführbar. Die Einsparungen während des Betriebes an ressourcenverbrauchenden Stoffwerten müssen höher sein als die Ressourcenaufwendung für die Herstellung, die Distribution

und die Entsorgung der Neuanlage. Die Entsorgung der Altanlage wird aufgrund der Irreversibilität bereits getroffener Entscheidungen hingenommen und nicht in der Gleichung (15-6) bewertet. In die Berechnung werden die Treibhausgasemissionen als maßgeblicher Faktor eingebunden, es sind aber auch andere Werte nach demselben Schema anwendbar. Sollten mehrere Ressourcen betrachtet werden, sind diese analog zu den Berechnungen aus Kapitel 12 einzubinden.

$$CF = CF_{Herst} + CF_{Distr} + CF_{Betr} + CF_{Recyc}$$

Analysepunkt für die Indifferenz der beiden Systeme:

$$CF_B = CF_N$$

$$CF_{Betr_B} = CF_{Herst_N} + CF_{Distr_N} + CF_{Betr_N} + CF_{Recyc_N}$$

Somit ergibt sich die Gleichung für die Mindestbetriebslaufzeit für eine ökologische Vorteilhaftigkeit:

$$n_{CFO_{min}} = \frac{CF_{Herst_N} + CF_{Distr_N} + CF_{Recyc_N}}{cf \cdot (V_B^B - V_N^B)} \quad (15-6)$$

Die folgende Gleichung zur Berechnung der äquivalenten Treibhausgasemissionen entspricht einem linearen Verlauf über dem Verbrauch des Systems:

$$CF_{Betr} = cf \cdot V^B \cdot n$$

Bei nichtlinearen Zusammenhängen muss die Gleichung angepasst werden.

Auch Gleichung (15-6) kann nach der notwendigen PhO-Faktordifferenz für einen ökologischen Vorteil aufgelöst werden:

$$\Delta F_{PhO_{CFO}} = \frac{CF_{Herst_N} + CF_{Distr_N} + CF_{Recyc_N}}{V_{PhO}^B \cdot n \cdot cf} \quad (15-7)$$

Anhand der Gleichungen ist bereits zu erkennen, dass ein ökologischer Vorteil schwieriger erreichbar ist als ein ökonomischer. Die Emissionsaufwendungen der Altanlage sind nur noch für die Betriebsphase bilanzierbar. Eine Neuanlage tritt durch die Produktionsaufwendungen, die Distribution und das kommende Recycling am Ende der Betriebslaufzeit in einen Vorkredit. Dies ist teilweise zwar identisch zu den ökonomischen Betrachtungen, doch dort haben auch Opportunitätskosten Einfluss. Die Signifikanz der ökologischen Betrachtung wird in Kapitel 16 mit der Obsoleszenzanalyse weitergehend betrachtet.

15.3 WEITERENTWICKLUNG DER POTENZIALANALYSE

Volta hat in seiner Dissertation eine Potenzialanalyse für die innerbetriebliche Handlungsmotivation entwickelt.³⁹ Sie berechnet sich aus dem Produkt des Verbrauchs und des PhO-

³⁹ Vgl. Volta, D. (2014), S. 86

Faktors nach Gleichung (7-7). Je höher das Ergebnis, desto größer ist die Handlungsmotivation. Jedoch fehlt der Bezugswert für das Ergebnis. Ein fiktives Beispiel soll verdeutlichen, worum es geht:

$$\text{Potenzial} = V \cdot F_{PhO}$$

$$\text{Potenzial} = 500 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 1,7 = 850 \text{ kWh/a}$$

Die Erkenntnis Voltas, dass ein höherer Wert eine größere Handlungsmotivation hervorruft, ist unbestritten. Aber wohin führt der Wert, und welches Potenzial verbirgt sich darin genau?

Eine Erweiterung mit den in dieser Arbeit entwickelten Gleichungen kann eine genaue Definition des Vorteils liefern (Gleichung (7-10)):

$$\text{Potenzial}_N = V_{PhO}^B \cdot \Delta F_{PhO_{B-N}} \quad (15-8)$$

Erweitert mit den aktuellen Betriebskosten gibt sie einen direkten monetären Vorteil wieder, welcher in vielen Fällen zu überzeugen weiß:

$$\begin{aligned} \text{Potenzial}_N &= V_{PhO}^B \cdot \Delta F_{PhO_{B-N}} \cdot k_{el} \\ \text{Potenzial}_N &= 400 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,15 \cdot 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 15 \text{ €/a} \end{aligned}$$

Voltas Grafik zur Handlungsmotivation (Abbildung 7-2) wäre durch die vorgestellte Ersatzanalyse substituiert. Für eine Handlungsmotivation nach Gleichung (15-8) ist jedoch eine technische Alternative erforderlich.

15.4 ERGEBNIS ERSATZPROBLEM

Das Ersatzproblem aus ökonomischer Sicht wurde über verschiedene Investitionsvergleichsrechnungen durchgeführt. Daraus konnten allgemeine Gleichungen mit den in dieser Arbeit entwickelten Allokationsfaktoren für die Teuerung und dem Barwert entwickelt werden. Diese basieren auf der dynamischen Kapitalwertmethode. Jedoch ist auch eine statische Berechnung möglich. Herleitungen der Gleichungen sowie Analysen der Investitionsmaßnahmen befinden sich im Anhang Kapitel V.

Das Ersatzproblem kann lediglich die betriebswirtschaftliche Sinnhaftigkeit einer Reinvestition in Abhängigkeit von der Effizienz aufdecken. Ist eine ökonomisch vertretbare Reinvestition nachgewiesen, dann sollte in den in dieser Arbeit entwickelten Kreislauf der Anlagengestaltung über die Wechselwirkungsanalyse und/oder in den Kreislauf der Technologieanalyse eingestiegen werden. Dabei ist es irrelevant, ob ein Nachweis (ökonomisch und/oder ökologisch) über die notwendige Restbetriebslaufzeit oder den PhO-Differenzleistungsfaktor geführt wird. Erst die Anlagengestaltung aus Kapitel 10 oder die Technologieanalyse aus Kapitel 12 ermöglichen eine Anlagengestaltung nach dem PhO, BwO und CFO.

Vorteilhaft für Unternehmen an dem entwickelten Verfahren ist die Möglichkeit das geplante Investitionskapital festzulegen und anschließend die Alternativvariante der Neuinvestition mit dem tatsächlichen Effizienzunterschied nach dem PhO zu vergleichen. Ist die Neuanlage effizienter (das Delta F-PhO der Ersatzanlage zur Bestandsanlage ist größer als das Mindestergebnis der Gleichung (15-3)) oder ist die Restbetriebszeit deutlich länger als die notwendige Restbetriebszeit aus Gleichung (15-2), dann sollte aus betriebswirtschaftlicher Sicht eine Reinvestition durchgeführt werden. Somit kann ein Unternehmen relativ einfach feststellen, ob eine Reinvestition ökonomisch sinnvoll ist. Und zwar bevor eine komplexere Analyse für die optimierte Anlage unter der Wechselwirkung zwischen dem PhO, BwO und dem CFO durchgeführt wird.

Ferner wurden Gleichungen entwickelt, um das Ersatzsystem unter ökologischen Gesichtspunkten zu beurteilen. Als Beispiel fungiert der Carbon Footprint, welcher aber durch andere Umweltbelastungen äquivalent ersetzbar ist.

Die in dieser Arbeit entwickelten Gleichungen für eine minimale Restbetriebslaufzeit oder den minimalen PhO-Differenzleistungsfaktor zwischen der Alt- und Neuanlage beziehen sich auf den Punkt der Indifferenz der Systeme zueinander. Es konnte aufgezeigt werden, dass eine ökologische Indifferenz in der Regel deutlich schwerer zu erreichen ist. Begründet ist dieser Effekt durch den Vorkredit der Umweltkosten basierend auf Produktion, Vertrieb und den zusätzlichen Recyclingaufwand der Neuanlage. Ein ausführliches Beispiel befindet sich in Kapitel V.

16 OBSOLESZENZANALYSE

16.1 BEDEUTUNG UND GRÜNDE DER OBSOLESZENZ

Wird ein Produkt vor seiner „optimalen“ Lebenserwartung erneuert, resultieren daraus steigende Umweltbelastungen für die Neuproduktion. Die Diskussion über Obsoleszenz hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Steigende Anforderungen an nachhaltige Produkte im Betrieblichen Nachhaltigkeitsmanagement und im privaten Sektor verdeutlichen die Prägnanz.

Prakash et al. (2016) untersuchten die Gründe für eine vorzeitige Reinvestition und die resultierenden Umweltauswirkungen. Zusätzlich stellt der Bericht *„Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltauswirkung“* Gegenmaßnahmen vor. Der Begriff der Obsoleszenz wird von Prakash et al. (2016) folgendermaßen definiert:

„Der Begriff Obsoleszenz bezeichnet die Alterung (natürlich oder künstlich) eines Produktes. Damit ist gemeint, dass das Produkt nicht mehr geeignet ist, ein Bedürfnis zu befriedigen.“ [38]

Somit beschreibt Obsoleszenz den frühzeitigen Ersatz eines Produktes vor Erreichen seiner optimalen Lebensdauer. Eine vorzeitige Erneuerung verursacht einen höheren Ressourcenverbrauch, belastet die Umwelt und kann zu wirtschaftlichen Nachteilen eines Unternehmens beitragen. Unter dem Begriff der „geplanten Obsoleszenz“ wird in der Bevölkerung und vor allem in den Medien die geplante Manipulation einzelner Komponenten zum Erzwingen einer Neuinvestition verstanden. Dieses Verständnis impliziert, dass einige defekte Komponenten (eventuell manipuliert) einer funktionellen Einheit, bestehend aus einer Vielzahl von Komponenten, für eine Verkürzung der Lebensdauer sorgen. In der Tat können Produktentwickler heutzutage die Standzeiten (Produktlebensdauer) mit einer Wahrscheinlichkeit von x berechnen. Die Lebensdauer sollte auf einen optimalen Kompromiss zwischen den ökonomischen und ökologischen Aspekten in der Produktplanung festgelegt werden.

Trotzdem ist festzuhalten, dass der Grund für Obsoleszenz nicht so einfach, wie in den Medien verbreitet, der Industrie zugeordnet werden kann. Es gibt weitere Gründe für die vorzeitige Erneuerung von Produkten.

Prakash et al. (2016) gaben vier Hauptkategorien für eine vorzeitige Erneuerung an:

- Bei der **werkstofflichen Obsoleszenz** sorgen mangelhafte Materialien oder einzelne Komponenten für einen vorzeitigen Verschleiß des Produktes.
- **Funktionale Obsoleszenz** resultiert aus veralteter Soft- bzw. Hardware, die nicht mehr eingesetzt werden kann.
- Zu einer **psychologischen Obsoleszenz** kommt es, wenn ein neues Produkt gewünscht wird, obwohl das alte Produkt noch einwandfrei funktioniert.

- Häufig sind die Kosten für die Reparatur eines defekten Produktes aus ökonomischen Gründen nicht mehr tragbar, dann kommt es zu einer **ökonomischen Obsoleszenz**.⁴⁰

Die psychologische Obsoleszenz hat gerade in der Unterhaltungs- und Informationselektronik bizarre Formen angenommen. Es wurde analysiert, dass über sechzig Prozent der Fernsehgeräte im Jahr 2012 erneuert wurden, obwohl das „alte“ Gerät noch voll funktionsfähig war. Der potentielle Kunde wird mit einer höheren Effizienz und besseren Auflösungen geködert, Daten zu Umweltauswirkungen durch die Produktion und Entsorgung sind hingegen nur äußerst spärlich verfügbar.

Bei Haushaltsgroßgeräten wurde eine deutliche Zunahme bei der werkstofflichen Obsoleszenz diagnostiziert. Während 2004 nur 3,5 Prozent der Großgeräte innerhalb der ersten fünf Jahre einen Defekt aufwiesen, so ist diese Zahl im Jahr 2013 mehr als verdoppelt (Anstieg auf 8,3 Prozent). Bei Waschmaschinen wurden sogar Ausfallraten von über zehn Prozent in den ersten fünf Jahren ermittelt.⁴¹

Ökonomische Obsoleszenz tritt vor allem durch hohe Reparaturkosten auf. Die Kosten für die An- und Abfahrt sowie eine beschränkte offene Verfügbarkeit für Diagnosegeräte und Ersatzteile verteuern die lebensdauerverlängernden Maßnahmen und sorgen für einen vorzeitigen Neuerwerb.

Bei der Analyse sind die Produkte auf ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit hin zu überprüfen. Die Beurteilung, ob lang- oder kurzlebigen Produkte vorteilhaft sind, hängt laut Parkash et al. von der Differenz der Investitionsaufwendungen der beiden Vergleichskomponenten ab. Ist eine geringe Preisdifferenz vorhanden, so haben die langlebigen Komponenten am Ende der Lebenszyklusrechnung geringere Aufwendungen verursacht. Gegenteilig fällt das Ergebnis aus, wenn sich die Preise für kurz- und langfristige Produkte signifikant unterscheiden. Zusätzlich zu betrachtende Reparaturkosten verhelten der kurzfristigen Variante zu einem möglichen ökonomischen Vorteil.

Die ökologische Bewertung hingegen bietet ein anderes Bild. Prakash et. al. haben in dem Abschlussbericht aufgedeckt, dass ökologische Vorteile eindeutig bei langlebigeren Produkten vorliegen, und das trotz des erhöhten Energiebedarfes von älteren Anlagen gegenüber effizienteren Neuanlagen.

Es ist festzustellen, dass kurzlebigere Komponenten ökologische Nachteile gegenüber langlebigeren aufweisen. Diese entstehen vor allem durch die Ressourcenaufwendungen bei der Produktion. Berücksichtigt wurden in dieser Untersuchung auch die erhöhten Wartungs- und Reparaturaufwendungen für langlebige Produkte.⁴²

⁴⁰ Vgl. Prakash, S., et al. (2016), S. 65

⁴¹ Vgl. Prakash, S., et al. (2016), S. 25

⁴² Vgl. Prakash, S., et al. (2016), S. 35

Die Empfehlungen aus dem Bericht sollen helfen, Obsoleszenz zu minimieren und mit Ressourcen effektiver umzugehen. Dabei ist die Effizienz einer Anlage nicht unbedingt die entscheidende Komponente.

Prakash et. al. geben folgende konkrete Handlungsempfehlungen, um Obsoleszenz zu vermeiden:

„Die Kernempfehlungen umfassen:

- 1. Festlegung von Produktstandards zur Mindestlebensdauer, als erster Schritt ggf. zunächst für Produktkomponenten.*
- 2. Einführung einer Informationspflicht zur Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Reparaturservice.*
- 3. Einführung einer Pflicht zur Angabe der garantierten Lebensdauer (Herstellergarantieausagepflicht).*
- 4. Erweiterung verbraucherschutz-rechtlicher Verbandsklagebefugnisse auf Umweltverbände.*
- 5. Verbesserte Rahmenbedingungen für Reparatur.*
- 6. Reduzierter Mehrwertsteuersatz für Reparaturdienstleistungen.*
- 7. Stärkung der Wertschätzung für Produkte.“ [39]*

Des Weiteren stellt sich auch hier die Frage nach einer optimalen Anlagengestaltung. Wenn Waschmaschinen nach zwei Jahren Schäden in den Lagern aufweisen und Anwenderfehler aufgrund der statistischen Häufigkeit ausgeschlossen werden können, dann muss die Konzeption der Maschine in Frage gestellt werden. Eine Waschmaschinenwelle kann physikalisch optimal konzipiert werden, wenngleich auch hier die Definition von „optimal“ erst einmal erarbeitet werden muss. Lager können nach der DIN 281 auf Lebenszyklen des Gesamtsystems ausgelegt werden. Die nominelle Lebensdauerberechnung der DIN 281 unterscheidet nach Lagerarten und Lastfällen, und die berechneten Lebensdauern werden mit einer Zuverlässigkeit von größer 90% erreicht.⁴³

Es gibt zahlreiche Vorschläge für eine kompromisslose Dauerfestigkeit, aber ist die Dauerfestigkeit das Physikalische Optimum? Oder liegt das Optimum in der minimalen Materialaufwendung, um die Anlage gerade noch an die geplante Lebenszeit zu führen? Zwei völlig unterschiedliche Ansätze, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Aus der ökonomischen Sicht des Herstellers legen wahrscheinlich die Kosten fest, welchem Ansatz gefolgt wird.

Der ökonomisch fixierte Kunde hingegen betrachtet die Lebenszykluskosten und hoffentlich nicht nur die Investition. Bewertet der Kunde die Lebenszykluskosten und somit u.a. den Energiebedarf während der Betriebsphase, dann bewertet er indirekt die Betriebsemissionen der Anlage (siehe Abbildung 6-1). Die Umweltaufwendungen während der Produktion, der Distribution und dem Recycling müssen für eine umfassende Bilanzierung zwingend eingebunden werden.

⁴³ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN ISO 281* (2010), S. 9

16.2 BEWERTUNG DER OBSOLESZENZ MIT DEM PHO

Die Bewertung über das Physikalische Optimum beschränkt sich lediglich auf die Effizienz zweier Systeme zueinander. Vorzeitige Reinvestitionen werden nicht erfasst und erfordern erweiterte Analysen. Es können sowohl die Verbrauchs- als auch die Leistungswerte bewertet werden (Kapitel 7):

$$\Delta F_{PhO} = F_{PhO_{sys1}} - F_{PhO_{sys2}}$$

Werden die Systeme bezüglich ihres elektrischen Energieverbrauchs bilanziert, ergibt sich aus Gleichung (7-10):

$$\Delta F_{PhO} = \frac{V_{el_{sys1}}^B - V_{el_{sys2}}^B}{V_{PhO}^B}$$

Resultiert ein positiver PhO-Differenzfaktor, so sind die Vorteile auf der Seite des zweiten Systems zu identifizieren. Ein kleinerer PhO-Faktor beschreibt eine höhere Effizienz bei energieverbrauchenden Systemen. Vorsicht ist bei der Analyse geboten, wenn energie-*erzeugende* Anlagen verglichen werden. Hier drehen sich die Effekte um.

16.3 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER OBSOLESZENZ

Die betriebswirtschaftliche Bewertung kann statisch über die abgeleitete Kapitalwertgleichung (8-10) erfolgen, dabei wird die Analyse aus der Sicht des Endverbrauchers durchgeführt. Bei der Betrachtung von kurzlebigen Investitionsgütern müssen die Reinvestitionskosten berücksichtigt werden. Die Variable j beschreibt die Häufigkeit der Investitionen während der Betriebslaufzeit n .

$$C_0 C = A_0 + K_{OK} \cdot n \cdot T \cdot Z_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc} \quad = 1 \quad = 1$$

$$j = \frac{n}{t_R} \quad (16-1)$$

Die Operationskosten werden auf den Verbrauch reduziert. Dieser stellt in der Regel den größten Kostenfaktor dar:

$$CoC_{Obs} = [A_0 + K_{Recyc}] \cdot j + \dot{V}^B \cdot k_{el} \cdot n \quad (16-2)$$

Die Differenzsumme zweier Systeme beschreibt den monetären Vor- bzw. Nachteil der Systeme untereinander:

$$\Delta CoC_{Obs} = CoC_{Obs_{sys1}} - CoC_{Obs_{sys2}} \quad (16-3)$$

Dabei gilt für das Ergebnis aus Gleichung (16-3):

$\Delta CoC_{Obs} > 0$, monetärer Vorteil System 2

$\Delta CoC_{Obs} = 0$, monetäre Indifferenz der Systeme

$\Delta CoC_{Obs} < 0$, monetärer Vorteil System 1

Bis zum Zeitpunkt der Kostenanalyse ist das System mit dem betriebswirtschaftlichen Vorteil nicht bekannt. Zu beachten ist, dass es sich nur um einen Vergleich zwischen den betrachteten Systemen handelt (System 1 und System 2). Weitere Konfigurationen und die Definition eines betriebswirtschaftlichen Optimums sind nicht bilanziert und somit nicht berücksichtigt.

16.4 PHYSIKALISCHER DIFFERENZLEISTUNGSFAKTOR

Für eine vereinfachte Analyse sind Gleichungen erforderlich, die eine Wechselwirkung der Bewertungsverfahren bzw. -ansichten beschreiben. Die Herleitung von Gleichung (16-4) ist im Anhang Kapitel VI ausführlich beschrieben.

Die folgende Gleichung beschreibt den PhO-Differenzleistungsfaktor in Abhängigkeit der Fixkosten und des physikalischen Optimalverbrauchs:

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} = \Delta f_{PhO_{sys1-sys2}}$$

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} = \frac{\Delta CoC_{Obs} + (A_{O_{sys2}} + K_{Recyc_{sys2}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{sys2}}\right) - (A_{O_{sys1}} + K_{Recyc_{sys1}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{sys1}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO}^B \cdot k_{el}} \quad (16-4)$$

Anschließend wird ΔCoC_{Obs} gleich null gesetzt, die Systeme sind indifferent. Das Ergebnis der Gleichung beschreibt somit den Kipppunkt zwischen den Vorteilhaftigkeiten und gibt eine betriebswirtschaftliche Gleichwertigkeit der Systeme an. Anders beschrieben bedeutet es, die Anlage mit der größeren Investitionsaufwendung muss einen Vorteil in der physikalischen Effizienz haben, der mindestens dem Ergebnis entspricht.

Sollten kurzlebige Produkte während der Betriebsphase durch Reinvestitionen ersetzt werden und weisen diese dann eine Steigerung in der Effizienz auf, muss der gemittelte Verbrauch betrachtet werden (Gleichung (16-5)). Die Faktordifferenz beschreibt also die gemittelte Effizienz der kurzlebigen Produkte zum langlebigen Produkt.

Die Anzahl der Reinvestitionsintervalle für die betrachtete Betriebszeit ergibt sich nach Gleichung (16-1).

$$V_{KLP}^B = \sum_{X=1}^j \left\{ \dot{V}_{KLP_{t=0}}^B \cdot t_{KLP} \cdot [1 - \Delta eff_j \cdot (X - 1)] \right\} \quad (16-5)$$

Abbildung 16-1 zeigt eine Lebenszyklusanalyse zwischen einem langlebigen Produkt und mehreren kurzlebigen Produkten über eine Betriebslaufzeit von zwanzig Jahren. Hier ist der wirtschaftliche Vorteil aufseiten der kurzlebigen Produkte zu identifizieren. Im Anhang Kapitel VI befindet sich eine Beispielberechnung.

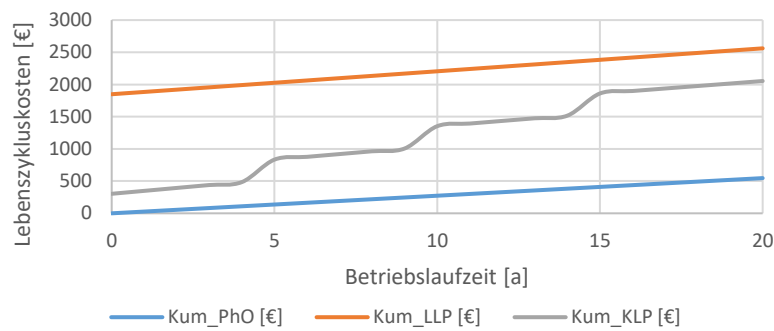


Abbildung 16-1: Ökonomische Obsoleszenz

Sollen zwei teilweise unabhängige Verbrauchsvariablen bilanziert werden, besteht die Möglichkeit, zwei Durchläufe hintereinander oder eine kombinierte Rechnung auszuführen. Die resultierende Gleichung enthält dann zwei unbestimmte Variablen. Zur Lösung dieser Gleichung legt man eine der Variablen fest und löst nach der anderen Variable auf. Gleichung (16-6) betrachtet das physikalische Optimum vom Wasserverbrauch (V_w) und vom elektrischen Energieverbrauch (V_{el}). Die Herleitung der Gleichung befindet sich im Anhang Kapitel VII.g.

$$\Delta f_{PhO_{Obs,w}} + \frac{\dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}}{\dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w} \cdot \Delta f_{PhO_{Obs,el}} = \frac{\Delta CoC_{Obs} + \left(A_{O_{sys2}} + K_{Recyc_{sys2}} \right) \cdot \left(\frac{n}{t_{sys2}} \right) - \left(A_{O_{sys1}} + K_{Recyc_{sys1}} \right) \cdot \left(\frac{n}{t_{sys1}} \right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO,w}^B \cdot kw} \quad (16-6)$$

Durch das Festlegen der ersten Verbrauchsvariable (festgelegt auf die aktuelle Differenz), die Berechnung der zweiten Variable und eine anschließende gegenläufige Betrachtung werden zwei Kombinationen errechnet. Eine Verbindungslinie der beiden Ergebnisse bildet die Grenze der Vorteilhaftigkeit (blaue Linie in Abbildung 16-2). Die beiden violetten Punkte stellen die Ergebnisse abhängig von den festgelegten Variablen dar. Die Vergleichsanlage (grüner Punkt) muss nun für einen ökonomischen Vorteil einen höheren physikalischen Differenzfaktor aufweisen.

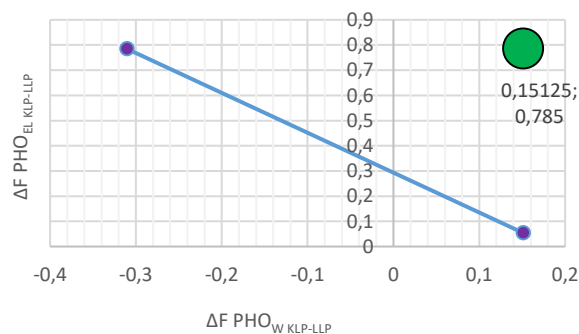


Abbildung 16-2: Grenzwerte Optima

16.5 BEWERTUNG DER OBSOLESZENZ ÜBER DEN CARBON FOOTPRINT

Die Bewertung des Carbon Footprints wird analog zur rein ökonomischen Bewertung durchgeführt. Als Grundlage dienen die Gleichung (5-3) aus Abschnitt 5.7 und die betriebswirtschaftliche Gleichung (16-2). Die Herstellungskosten werden durch den CO₂-äquivalenten Emissionsausstoß während der Produktion und der Distribution der Ware ersetzt. Die einbezogenen Lebenszyklen müssen identisch für die zu vergleichenden Systeme sein. Die Recyclingkosten werden durch die Emissionsaufwendungen beim Recycling ersetzt. Die Energiekosten sind durch den spezifischen CO₂-äquivalenten Ausstoß für die verbrauchten Energieeinheiten zu ersetzen. Der betrachtete Energieverbrauch der Systeme lässt sich aufgrund desselben Standorts und der identischen Energieeinbindung, mit demselben spezifischen Emissionswert berechnen. Quelle für den spezifischen Emissionswert ist Abbildung 9-1.

$$CF = [CO_{2\text{ äqHerst}} + CO_{2\text{ äqRecyc}}] \cdot j + \dot{V}^B \cdot CO_{2,el} \cdot n \quad (16-7)$$

Im Vergleich der beiden Systeme bildet man die Differenz der Emissionsaufwendungen:

$$\Delta CF_{Obs} = CF_{sys1} - CF_{sys2} \quad (16-8)$$

Dabei gilt für das Ergebnis:

$\Delta CF_{Obs} > 0$, ökologischer Vorteil System 2

$\Delta CF_{Obs} = 0$, ökologisches Gleichwertigkeit der Systeme

$\Delta CF_{Obs} < 0$, ökologischer Vorteil System 1

16.6 WECHSELWIRKUNG PHO-CFO

Für eine Analyse der Nachhaltigkeit bezogen auf die Obsoleszenz wird die minimale Effizienzdifferenz der Anlagen untereinander bewertet. Die fixen Emissionsbelastungen aus der Herstellung, der Distribution und dem Recycling werden zu fixen CO₂-äquivalenten Emissionsbelastungen zusammengefasst:

$$\begin{aligned} CO_{2\text{ äqfix}} &= CO_{2\text{ äqHerst}} + CO_{2\text{ äqDistr}} + CO_{2\text{ äqRecyc}} \\ \Delta f_{PhO_{Obs,CF}} &= \frac{\Delta CF + CO_{2\text{ äqfix sys2}} \cdot \left(\frac{n}{t_{sys2}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO}^B \cdot CO_{2,el}} - \frac{CO_{2\text{ äqfix sys1}} \cdot \left(\frac{n}{t_{sys1}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO}^B \cdot CO_{2,el}} \\ \Delta f_{PhO_{Obs,CF}} &= \frac{\Delta CF + CO_{2\text{ äqfix sys2}} \cdot \left(\frac{n}{t_{sys2}}\right) - CO_{2\text{ äqfix sys1}} \cdot \left(\frac{n}{t_{sys1}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO}^B \cdot CO_{2,el}} \end{aligned} \quad (16-9)$$

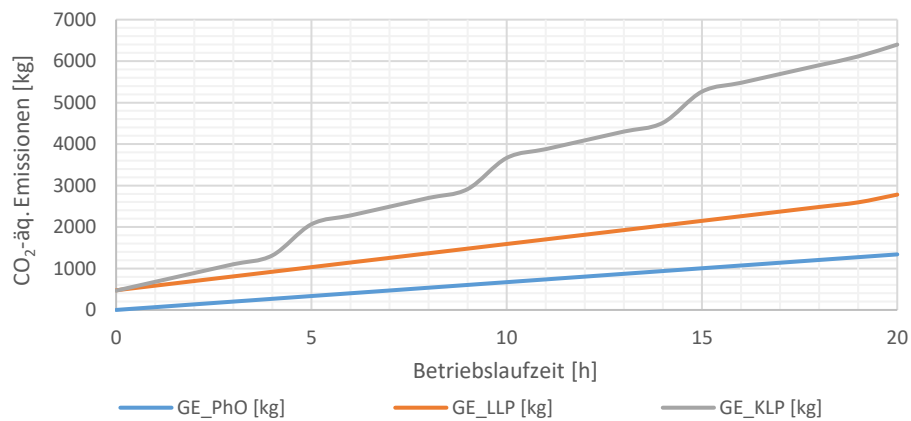


Abbildung 16-3: CF-Analyse Waschmaschine

Abbildung 16-3 zeigt den Vergleich zwischen einem langlebigen und mehreren kurzlebigen Produkten inklusive der Emissionsaufwendungen durch notwendige Reinvestitionen des kurzlebigen Produktes.

16.7 ERGEBNIS OBSOLESZENZANALYSE

Die hier entwickelten Gleichungen über die Betriebslaufzeit oder dem Physikalischen Differenzleistungsfaktor helfen, Obsoleszenz aufzudecken und zu verhindern. Dabei wird differenziert nach einer ökonomischen und ökologischen Obsoleszenz. Vorzeitige Erneuerungen widersprechen dem Gedanken der Nachhaltigkeit und können nur durch deutliche ökonomische oder ökologische Vorteile gerechtfertigt werden.

Im Anhang Kapitel VI befindet sich eine detaillierte Herleitung der entwickelten Gleichungen und eine ausführliche Beispielrechnung.

17 FAZIT

In der Dissertation konnten die Wechselwirkungen zwischen einer ökonomischen und ökologischen Auslegung von Systemen gezeigt werden. Obwohl sich die Bewertungskriterien auf den ersten Blick zu widersprechen scheinen, kommt es zu einer Dependenz bei langfristigen Betrachtungen. Lebenszyklusanalysen im Bereich der Ökonomie und Ökologie konnten über eine gemeinsame Systemvariable kombiniert werden.

Die entwickelten Gleichungen der *Wechselwirkungsanalyse* (Kapitel 10) über den Anlagenfaktor (F_{AN}) ermöglichen eine Systemgestaltung ex ante in einem Kompromisspunkt nach dem Physikalischen Optimum (PhO) und dem Betriebswirtschaftlichen Optimum (BwO). Dabei stellt die grenzwertbezogene Betrachtung des Physikalischen Optimums unüberwindbare Grenzwerte für eine einheitliche Betrachtung zur Verfügung.⁴⁴ Die Betrachtung lässt sich erweitern, indem die ökologische Nachhaltigkeit in das Wechselwirkungsergebnis einbezogen wird.⁴⁵

Die Kombination der unterschiedlichen Betrachtungen in der *Wechselwirkungsanalyse* ermöglicht die optimale Anlagenkonfiguration im Schnittpunkt der Einflussparameter (Abbildung 17-1). Sie legt somit den Grundstein für eine effiziente, nachhaltige Systemgestaltung unter verschiedensten Prämissen. Einseitige Anlagendimensionierungen lassen sich so aufdecken und vermeiden.

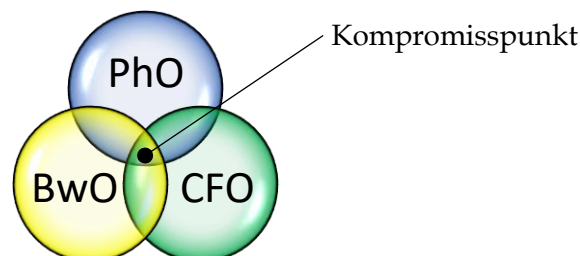


Abbildung 17-1: Optimaler Kompromisspunkt zwischen dem PhO, BwO und CFO

Nachhaltige Anlagenkonzeptionen sorgen für eine dauerhafte Ressourceneffizienz über den gesamten Lebenszyklus des Systems. Somit greift eine optimale Systemgestaltung direkt in die Mechanismen eines Umweltmanagementsystems und kann einen Beitrag bei der Erfüllung zukünftiger Ressourceneffizienzsteigerungen leisten.

Die Effektivität unterschiedlicher Systemkonfigurationen lässt sich über das hier entwickelte Verfahren der *Technologieanalyse* (Kapitel 12) untersuchen. Durch das Verfahren ist eine gemeinsame Bewertung unterschiedlichster Systemeigenschaften darstellbar. Ist die grundlegende Technologie festgelegt, kann anschließend in der *Wechselwirkungsanalyse* die höchste Ressourceneffizienz in Verbindung mit der Ökonomie bestimmt werden.

⁴⁴ Solange die physikalischen Gesetze gelten.

⁴⁵ Die Arbeit berücksichtigt den Carbon Footprint. Andere Bewertungskriterien sind äquivalent einsetzbar.

Untersuchungen ex post der Ressourceneffizienz bereits existierende Systeme unter Berücksichtigung ökonomischer Gesichtspunkte können über die entwickelten Verfahren der *Wartungszeitpunktanalyse* (Kapitel 14) und des *Ersatzproblems* (Kapitel 15) durchgeführt werden.

Die *Wartungszeitpunktanalysen* untersuchen den optimalen Wartungszeitpunkt nach ökologischen und ökonomischen Prämissen. Der Bezug auf das PhO ermöglicht ein Anlagen-Monitoring.

Über das entwickelte Verfahren des *Ersatzproblems* lässt sich eine bestehende Anlage mit einer möglichen Neuanlage vergleichen. Resultierende Effizienzsteigerungen über den PhO-Differenzleistungsfaktor ermöglichen eine Bilanzierung der Ressourceneffizienz in Abhängigkeit der Ökonomie und Ökologie. Die Lebenszyklusaufwendungen werden der Neuanlage aufgelastet und die notwendigen Einsparungen während der Betriebsphase für eine Indifferenz der Systeme prognostiziert.

In der *Obsoleszenzanalyse* (Kapitel 16) wird der Einfluss der Systemlebensdauer auf die ökologische und ökonomische Anlagenbewertung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass langlebigere Systeme häufig Vorteile in der Ressourceneffizienz gegenüber kurzlebigeren Systemen aufweisen. Das gilt selbst dann, wenn die Effizienz der kurzlebigeren Systeme während der Reinvestition gesteigert wurde.

Zu allen Analysewerkzeugen wurden ausführliche Beispiele durchgeführt und im Anhang dieser Arbeit dokumentiert, um die Aussagekraft der entwickelten Verfahren zu stützen. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich eine reine Effizienzsteigerung kontraproduktiv auf die ökonomischen und ökologischen Lebenszykluskosten auswirkt. Somit muss die Strategie der Bundesregierung, die Klimaneutralität über Effizienzsteigerungsmaßnahmen zu erreichen, kritisch hinterfragt werden. Effizienzsteigerungen sind sicherlich sinnvoll, sie dürfen aber nur soweit durchgeführt werden, wie sie ökologische Vorteile generieren. Eine kontinuierliche Verbesserung, wie sie z. B. die DIN EN ISO 50001 fordert, muss somit ökologisch gesetzte Grenzen erhalten.

18 LITERATUR

- [1] Volta, D.: *Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen, Dissertation*, Technische Universität Clausthal **2014**.
- [2] *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie: Analyse und Empfehlungen*, 2. Auflage (Hrsg: T. Bauernhansl, A. Sauer), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2014**.
- [3] *Umweltbewertung für Ingenieure: Methoden und Verfahren* (Hrsg: M. Schebek, L. Kaltschmitt), Springer, Heidelberg **2015**.
- [4] Nertinger, S.: *Carbon and Material Flow Cost Accounting: Ein integrierter Ansatz im Kontext nachhaltigen Erfolgs und Wirtschaftens*, Hallesche Schriften zur Betriebswirtschaft, Vol. 31, Springer Gabler, Wiesbaden **2015**.
- [5] Marzelli, S., et al.: *Der Wert der Natur für Wissenschaft und Gesellschaft, Ein Beitrag Deutschlands zum internationalen TEEB-Prozess*, Leipzig **2012**.
- [6] Fischer, H.: *Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zu den Grundlagen des Treibhauseffektes*, Kalsruhe **2008**.
- [7] Nordhaus, W. D.: *Strategies for the Control of Carbon Dioxide, Discussion Paper*, Yale University **1977**.
- [8] Karcher, S.: *Ein Preis für Treibhausgasemissionen - Marktbasierte Instrumente für den internationalen Klimaschutz*, Berlin **2016**, www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/ein-preis-fuer-treibhausgasemissionen (Stand: 01.12.2016).
- [9] Graichen, P., et al.: *Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2016. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2017.*, Berlin **2017** (104/01-A-2017/DE), www.agora-energiewende.de (09.03.2017).
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Energiekonzept: für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, Berlin **2010**.
- [11] Bertelsmann Lexikographisches Institut: *Goldmann Lexikon: Navi-Pakt*, Wilhelm Goldmann Verlag, München **1998**.
- [12] Meadows, D.: *Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*, Rororo, Rowohlt, Reinbek b. Hamburg **1972**.
- [13] Müller, D.: *Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure*, 2. Auflage, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg **2013**.
- [14] Wöltje, J.: *Betriebswirtschaftliche Formelsammlung*, 5. Auflage, HaufeLexware, Freiburg **2011**.
- [15] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 2884*, Beuth-Technische Informationsbibliothek, Düsseldorf **2005**.
- [16] Brundtland, G. H.: *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development* **1987**.
- [17] Colman, B.: *Nachhaltigkeitscontrolling: Strategien, Ziele, Umsetzung*, 2. Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden **2016**.
- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN ISO 26000*, Beuth Verlag, Berlin **2011**, 03.020; 03.100.01.
- [19] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4800 Blatt 1*, Beuth-Technische Informationsbibliothek, Dortmund **2016**, 03.100.01, 13.020.01 (4800).

- [20] Weber, M.: *Ressourcenmanagement – Managementsysteme und ihr Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz: Kurzanalyse Nr. 13: Ressourcenmanagement – Managementsysteme und ihr Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz*, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 13, Berlin **2015**, www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_Nr_13_Ressourcenmanagement_web.pdf (Stand: 01.12.2016).
- [21] Sachverständigenrat für Umweltfragen: *UMWELTGUTACHTEN 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt*, Berlin **2012**.
- [22] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4602 Blatt 1*, Beuth-Technische Informationsbibliothek, Düsseldorf **2007**, 01.040.27, 27.010 (4602).
- [23] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN ISO 50001*, Beuth Verlag, Berlin **2011**, 27.010. Auflage (50001) (Stand: 04.11.2016).
- [24] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN ISO 14040*, Beuth Verlag, Berlin **2009**.
- [25] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4600 Berechnungen*, Beuth-Technische Informationsbibliothek, Düsseldorf **2012**, 01.040.27, 27.100 (4600).
- [26] Baumann, B., et al.: *Physik für Ingenieure: Bachelor Basics ; mit 21 Tabellen*, 2. Auflage, Schlenbach, Wilburgstetten **2011**.
- [27] Keichel, C.: *Methode der grenzwertorientierten Bewertung: Energie- und Ressourceneffizienz von Gesamtbetriebsweisen, Dissertation*, Technische Universität Clausthal **2017**.
- [28] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN V 18599-10*, Beuth Verlag, Berlin **2016**, 91.120.10; 91.140.01.
- [29] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN V 18599-4*, Beuth Verlag, Berlin **2016**, 91.120.10; 91.160.10.
- [30] Petra Icha, Gunter Kuhs: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015*, Dessau-Roßlau **2016** (ISSN 1862-4359), www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-2 (Stand: 09.03.2017).
- [31] Reick, M., Palecki, S.: *Auszug aus den Tabellen und Formeln der DIN EN ISO 6946*, Essen **1999**.
- [32] Becker, N.: *Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau: Kurzanalyse Nr. 7: Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau*, Berlin **2014**, www.ressource-deutschland.de/publikationen/kurzanalysen/ (Stand: 22.11.2016).
- [33] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN EN 15804; Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012 + A1:2013; Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013*, Beuth Verlag, Berlin **2014**, ICS 91.010.99 (EN 15804:2012+A1).
- [34] Günther, S.: *Übersicht: Die wichtigsten Dämmstoffe und ihre Eigenschaften*, Hannover **2016**, www.energieheld.de/daemmung/daemmstoffe/daemmstoff-uebersicht (Stand: 11.06.2017).
- [35] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 4600 Blatt 1*, Beuth-Technische Informationsbibliothek, Düsseldorf **2015**, 13.020.60, 27.010 (4600).
- [36] Kruft, A., et al.: *Tabellenbuch Metalltechnik*, 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin **2013**.

- [37] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN 31051*, Beuth-Technische Informationsbibliothek, Berlin **2012**, 01.040.03; 03.080.10 (31051).
- [38] Prakash, S., et al.: *Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“*, Dessau-Roßlau **2016** (ISSN 1862-4804), www.umweltbundesamt.de/publikationen/einfluss-der-nutzungsdauer-von-produkten-auf-ihr (Stand: 05.12.2016).
- [39] Oehme, I., Jacob, A.: *Strategien gegen Obsoleszenz: Sicherung einer Produktmindestlebensdauer sowie Verbesserung der Produktnutzungsdauer und der Verbraucherinformation*, Dessau-Roßlau **2016** (ISSN 2363-8273), www.umweltbundesamt.de/publikationen.
- [40] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN ISO 281*, Beuth Verlag, Berlin **2010**,
- [41] Umweltbundesamt, Burger, A.: *Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr: Empfehlungen des Umweltbundesamtes*, Dortmund **2012**.
- [42] VDI-Wärmeatlas: *Druckverlust in einphasigen Strömungen*, VDI Buch (Hrsg: Verein Deutscher Ingenieure), Springer, Berlin, Heidelberg **2006**.
- [43] RM-Stahlhandel GmbH: *Preisliste Rohre 2008: Nahtlose normalwandige Stahlrohre DIN 2448 ST 37* **2008**, www.rm-stahl.de/pdf/2008/040340_05_gewinde_neu.pdf (Stand: 29.04.2017).
- [44] Bayer, R., et al.: *Impulse Physik*, 1. Auflage, Klett, Stuttgart **2005**.
- [45] Stühlen, L., Reichl, M.: *Ökobilanz beweist Umweltfreundlichkeit von LED-Lampen: OSRAM Opto Semiconductors zeigt die Ergebnisse einer Gesamtlebenszyklusanalyse für LED-Lampen*, München **2009**.
- [46] Argendorf, M.: *TCO Berechnung ABZ Aggregate-Bau GmbH*, Henstedt-Ulzburg **2017** (Stand: 09.03.2017).
- [47] Gensch, C.-O., Blepp, M.: *Betrachtungen zu Produktlebensdauer und Ersatzstrategien von Miele-Haushaltsgeräten: Im Auftrag der Miele & Cie. KG, Carl-Miele-Straße 29. 33332 Gütersloh, Freiburg* **2015** (Stand: 19.12.16).
- [48] Öko-Institut e.V.: *EcoTopTen-Kriterien Waschmaschinen*, Freiburg **2016**, www.ecotopten.de/sites/default/files/ecotopten_kriterien_waschmaschinen.pdf (Stand: 18.12.2016).
- [49] EcoTopTen: *Infotabelle Energieeffiziente Waschmaschinen im Vergleich, Stand Feb.2017* **2017**, www.ecotopten.de/grosse-haushaltsgeraete/waschmaschinen (Stand: 20.04.2017).
- [50] Beko: *Frontlader WML 81433 MEU: EAN: 869 084 299 2469*, 2010 (Stand: 20.04.2017).
- [51] Miele: *WMF 121 WPS-DE-de: Gebrauchsanweisung Waschmaschine*.
- [52] Bosch: *Bosch WAW285ECO: EcoEdition Waschwollautomat, Datenblatt* (Stand: 20.04.2017).

Hinweis zum Zitationsstil:

Direkte Zitate sind in der Arbeit mit eckigen Klammern versehen – Beispiel [1].

Hinweise wurden mit Fußnoten deklariert.

**Wechselwirkungsanalyse zwischen dem
Physikalischen Optimum, dem Betriebswirtschaftlichen
Optimum und dem Carbon Footprint Optimum
(PhO-BwO-CFO)**

Dissertation - Anhang

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Nicolei Beckmann
aus Kaltenkirchen

genehmigt von der Fakultät für
Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung
01.12.2017

I LEBENSLAUF



Nicolei Beckmann
Primelweg 6
24568 Kaltenkirchen
Tel. 0162/9256058

Kaltenkirchen, 01.12.17

LEBENS LAUF

Nicolei Beckmann
Geboren 10.05.1982 in Kaltenkirchen (SH)
Ledig, eine Tochter

Akademischer Werdegang

01.12.17	Disputation
01.10. 2016 - aktuell	Promotion an der TU-Clausthal
01.09. 2014 - 24. Feb. 2016	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg M. Sc. Fachrichtung Nachhaltige Energiesysteme
01.09. 2010 - 21. Feb. 2014	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg B. Eng. Fachrichtung Energie- und Anlagensysteme
01.08. 2010 -21.02. 2014	Stipendium der Begabtenförderung berufliche Bildung

Beruflicher Werdegang

März. 2016 – aktuell	M. Sc.	ABZ Aggregate-Bau GmbH & Co. KG, Henstedt-Ulzburg
März. 2014 – Feb. 2016	B. Eng.	ABZ Aggregate Bau-GmbH-& Co. KG, Henstedt-Ulzburg
Mai. 2004 - Aug. 2010	Kfz-Werkstattleiter	Meisterhaft-Autoreparatur, Quickborn
Jan. 2003 - Aug. 2003	Kfz-Elektriker	Meisterhaft-Autoreparatur, Quickborn
April 2002 - Dez. 2002	Grundwehrdienst	Fallschirmjäger, Zweibrücken
Feb. 2002 - März 2002	Kfz-Elektriker	Boschdienst Strehl, Quickborn
Sep. 1998 - Jan. 2002	Ausbildung	
	Kfz-Elektriker	Boschdienst Strehl, Quickborn

Schulbildung

Sep. 2003 - April 2004	Kfz-Technikermeister (Bildungs-Technologiecenter Heide) Allgemeine Hochschulreife
Aug. 1992 - Juni 1998	Heinrich-Hertz-Realschule Quickborn Mittlere Reife
Aug. 1988 - Juli 1992	Grundschule Hemdingen

II WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN

Vorträge:

- | | |
|------------|--|
| 18.05.2016 | Vortrag an der HAW Hamburg (N. Beckmann):
Kraft-Wärmekopplung unter Einsatz von alternativen
Kraftstoffen |
| 18.05.2016 | Vortrag an der HAW Hamburg (N. Beckmann):
Hybrid Offgrid Power Generation |
| 17.05.2017 | Vortrag Datacentermesse R_Evolution Forum 2017 in
Schweinfurt Vintin (Rainer Brela/Nicolei Beckmann):
Stromnetzstabilitäten und Netzausfallersatzsysteme in
Rechenzentren |

Publikationen:

keine

III ANALYSE WECHSELWIRKUNG

A. WÄRMEWÜRFELSIMULATION MATLAB PHO, BWO UND CFO

Für eine schnelle Simulation mit unterschiedlichen Parametern wurde ein Matlabprogramm entwickelt. Das Programm simuliert die ökologischen und ökonomischen Effekte des zu bewertenden Systems. Unterschiedliche Randparameter können für eine individuelle Analyse definiert werden (z. B. Betriebslaufzeiten und Teuerungsraten). Die im Verlauf ausgewerteten Ergebnisse resultieren aus einer Simulation mit den Variablenbelegungen nach der Tabelle 19-1.

Anschließend werden die Optima der einzelnen Konfigurationen bestimmt. Das Tool rechnet in Millimeterschritten die einzelnen Anlagen und ihre resultierenden Anlagenparameter durch und vergleicht diese untereinander. Die Ergebnisse der Simulation sollen eingesetzt werden, um die entwickelten Gleichungen aus den Kapiteln 8 bis 11 zu überprüfen. Somit sind in einem ersten Schritt die Bilanzgrenzen identisch mit der Analyse aus Kapitel 11 festzulegen.

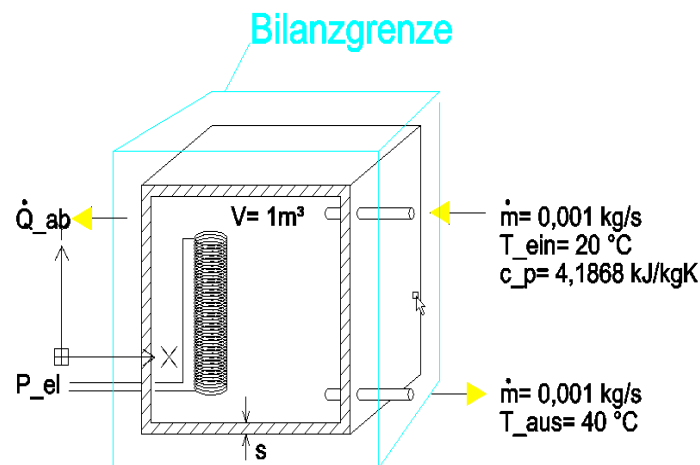


Abbildung 19-1: Bilanzsystem von einem Wärmewürfel

In den Abbildungen 19-2 bis 19-4 werden die Abläufe innerhalb des Programms grafisch dargestellt. Dabei führt das Programm für alle Isolierstärken von 0 bis 2500 mm in Millimeterschritten laufzeitabhängige Berechnungen durch. Diese werden auf ihr absolutes Minimum hin untersucht. Explizit wird nach der Konfiguration der jeweiligen Datenreihe mit dem geringsten Wert gesucht. Dabei werden die Kosten nicht im negativen berechnet, sondern als Ausgaben deklariert.

Tabelle 19-1: Wertebelegung Wärmewürfelsimulation

Variablenbelegung			
Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Wassermassenstrom	\dot{m}_W	0,001	kg/s
Spezifische Wärmekapazität von Wasser	c_p	4,186	kJ/kgK
Temperatur Wassereintritt	T_{ein}	20	°C
Temperatur Wasseraustritt	T_{aus}	40	°C
Temperatur Umgebung	T_{umg}	20	°C
Wärmeübergangswiderstand, horizontal, innen	$R_{si,hor}$	0,13	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand, horizontal, außen	$R_{se,hor}$	0,04	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand, vertikal, innen	$R_{si,vert}$	0,1	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand, vertikal, außen	$R_{se,vert}$	0,04	m²K/W
Wärmeleitfähigkeit Isolierung	λ	0,035	W/mK
Isolationsstärke	s	0,001 – 2,500	m
Spezifische Investitionskosten Isolierung	k_I	50,00	€/m³
Spezifische Recyclingkosten Isolierung	k_{Recyc}	15,00	€/m³
Elektrische Energiekosten	k_{el}	0,25	€/kWh
Elektrischer Wirkungsgrad Heizung	η_{Heiz}	100	%
Teuerungsrate pro Jahr	TZ	3	%
Emissionsaufwendungen Isolierung	cf_{Iso}	89,1	kgCO ₂ -äq/m³
Emissionsaufwendungen Strom	cf_{el}	0,535	kgCO ₂ -äq/kWh
Betriebslaufzeit	n	20	a
Äquivalente Emissionskosten Isolierung	$k_{CO_2-\text{äq } Iso}$	80,00	€/tCO ₂
Äquivalente Emissionskosten Energie	$k_{CO_2-\text{äq } el}$	0,08	€/kgCO ₂

Das bedeutet, dass für jede Isolierstärke und für jedes Betriebsjahr eine Simulationsschleife durchlaufen wird. Innerhalb eines Betriebsjahres wird der geringste Wert z. B. für die Treibhausgasemissionen über den kompletten Lebenszyklus gesucht und die dazugehörige Isolationsstärke ausgegeben. Die jeweiligen Optima wurden grafisch in Abbildung 19-5 über die Betriebslaufzeit dargestellt. Die Datenreihe BwO & CO₂ enthält eine zusätzliche betriebswirtschaftliche Betrachtung der Treibhausgasemissionen auf einer monetären Ebene. Dazu werden die CO₂-äquivalenten Emissionen mit einem monetären Wert versehen (siehe Tabelle 19-1) und in die Bilanzierung eingebunden. Als Kostenbasis fungiert die Umweltkostenanalyse des Umweltbundesamtes.⁴⁶ In aktuellen Diskussionen wird das monetarisieren von Umweltbelastungen kontrovers diskutiert. Es stellt sich als großes Problem heraus Umweltbelastungen ökonomisch zu gewichten.

⁴⁶ Vgl. Umweltbundesamt, Burger, A. (2012), S. 5

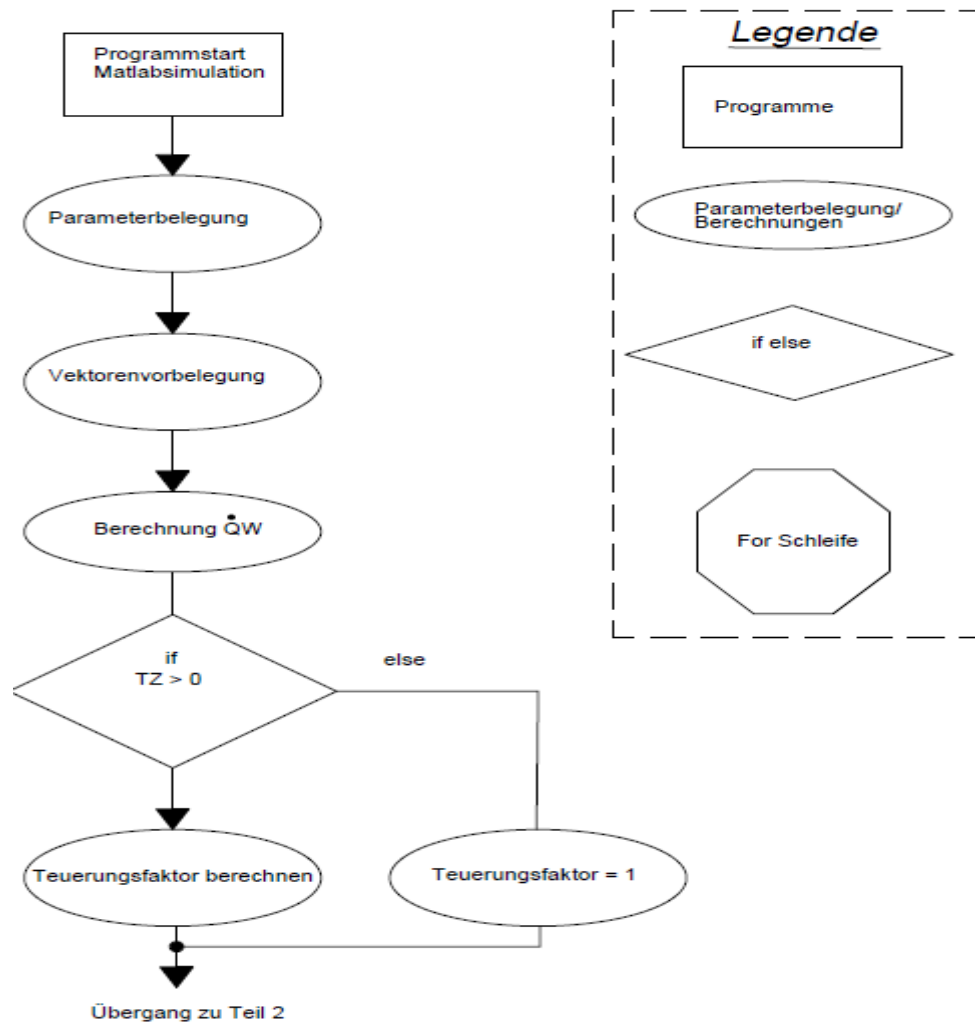


Abbildung 19-2: Schema Simulationsprogramm Matlab Teil 1

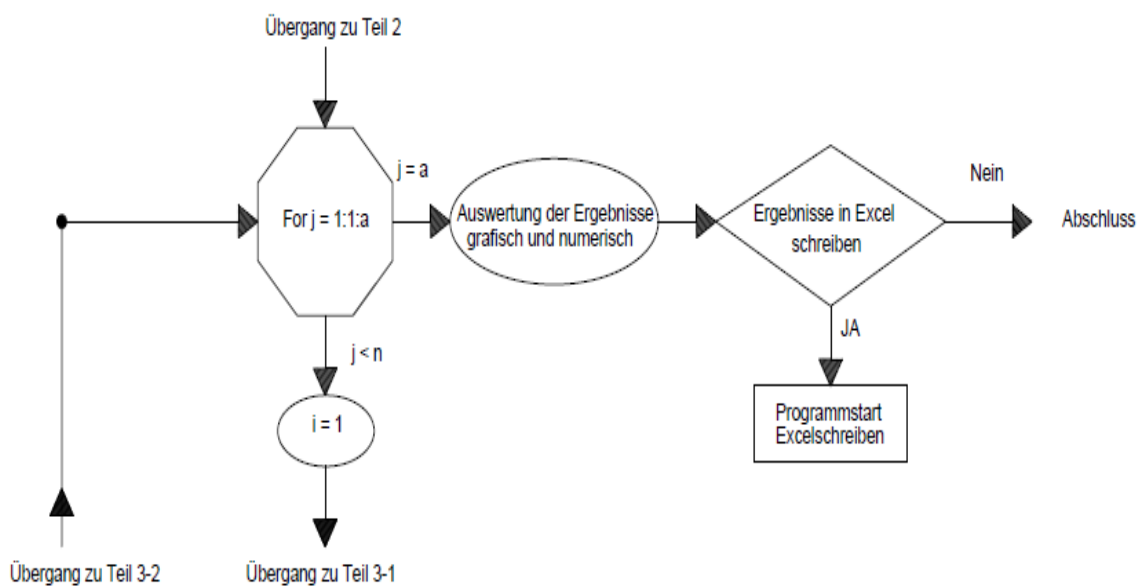


Abbildung 19-3: Schema Simulationsprogramm Matlab Teil 2

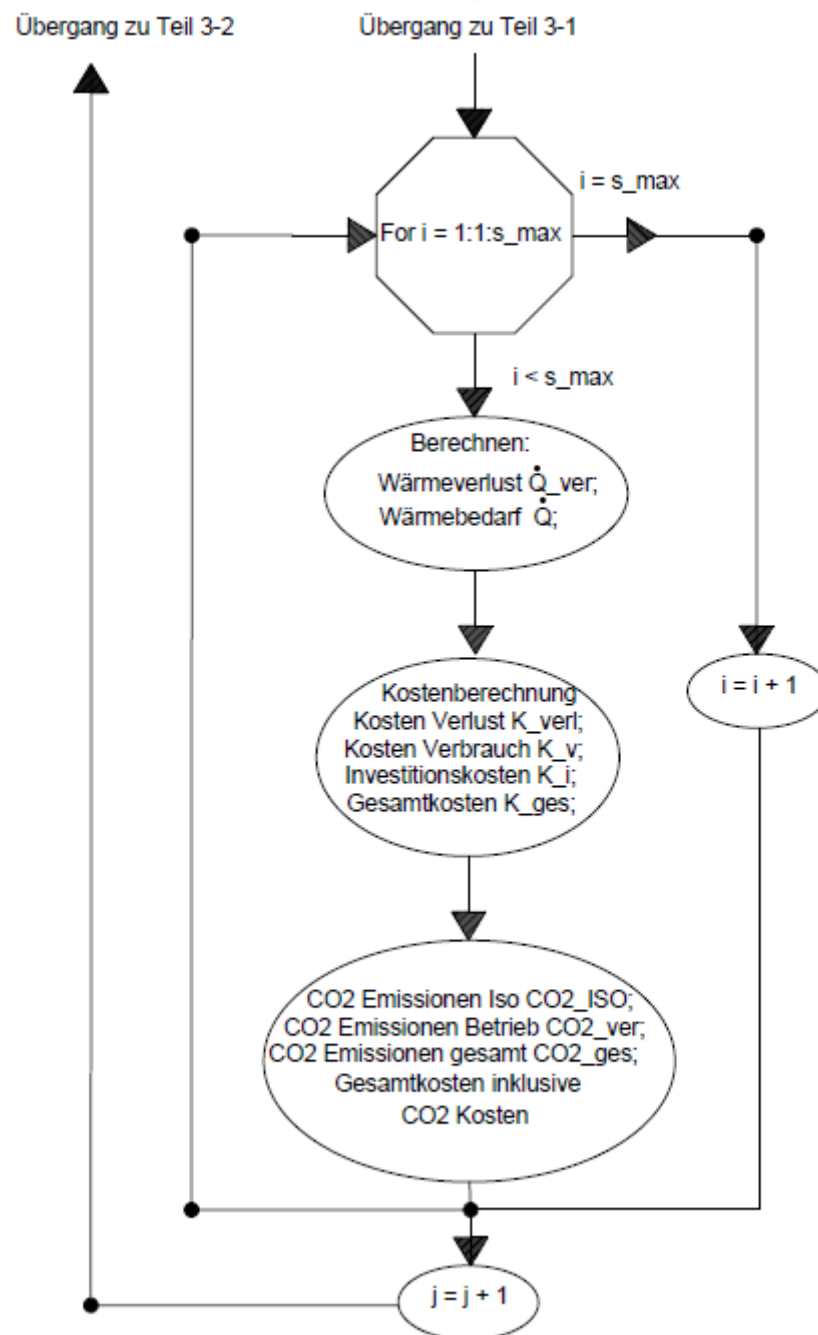


Abbildung 19-4: Schema Simulationsprogramm Matlab Teil 3

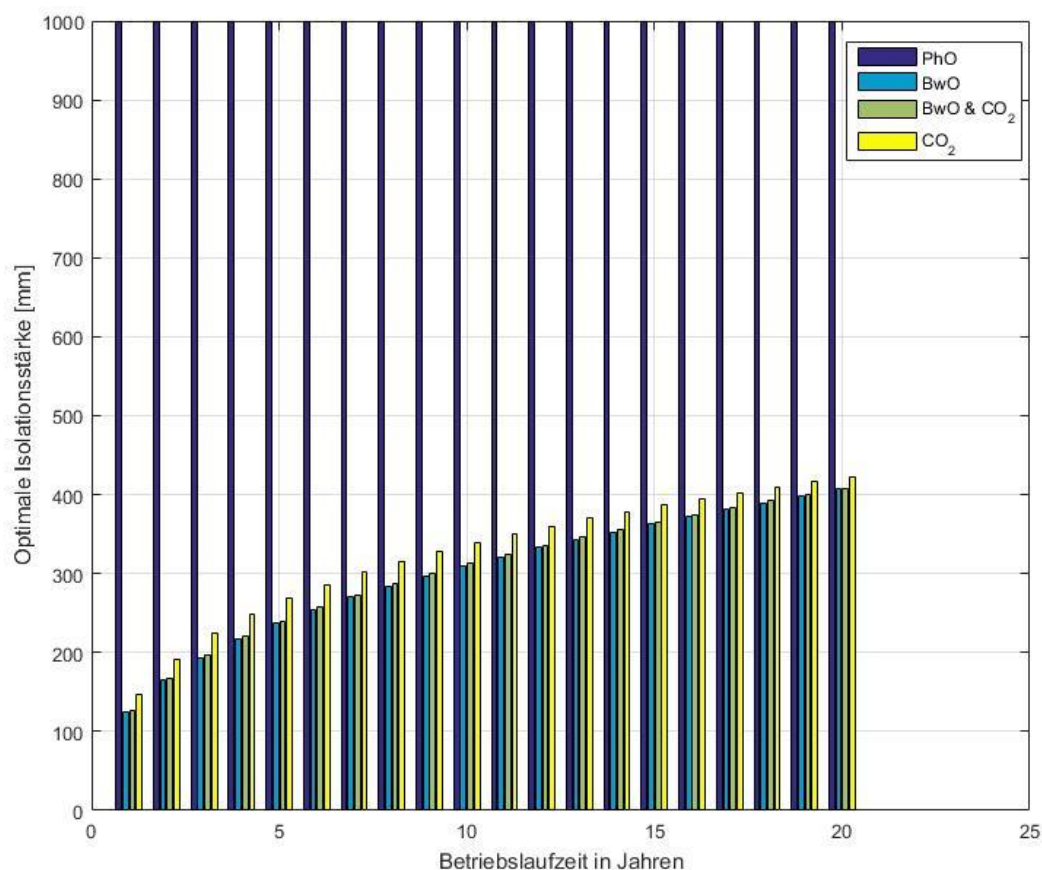


Abbildung 19-5: Auswertung Optima der Matlabsimulation

In Abbildung 19-6 sind die Betriebsparameter über der Isolationsstärke aufgelistet. Die betrachtete Anlagenbetriebszeit beläuft sich auf ein Betriebsjahr. Die Sterne deuten auf die Positionen der jeweiligen Optima hin.

Die Simulationsergebnisse zu den angegebenen Anlagenbetriebswerten aus Tabelle 19-1 sind vermerkt in Tabelle 19-7 und Tabelle 19-8. Zusätzlich werden die Simulationsergebnisse für eine Anlagenbetriebslaufzeit von fünf und zehn Jahren ausgegeben und geprüft. Die Teuerung geht über die entwickelte Gleichung (8-8) nach der Tabelle 19-2 mit drei Prozent in die Berechnungen ein. Die theoretischen monetären Emissionskosten sind lediglich in der Isolationsstärkenanalyse (BwO inkl. CO₂) berücksichtigt. In den realen Kostenberechnungen der folgenden Tabellen bleiben die aktuellen kostenfreien Ressourcen unberücksichtigt.

Tabelle 19-2: TZ-Faktoren, basierend auf einer TR von 3%

	Betriebslaufzeit 5a	Betriebslaufzeit 10a	Betriebslaufzeit 20a
TZ-Faktor	1,094	1,181	1,384

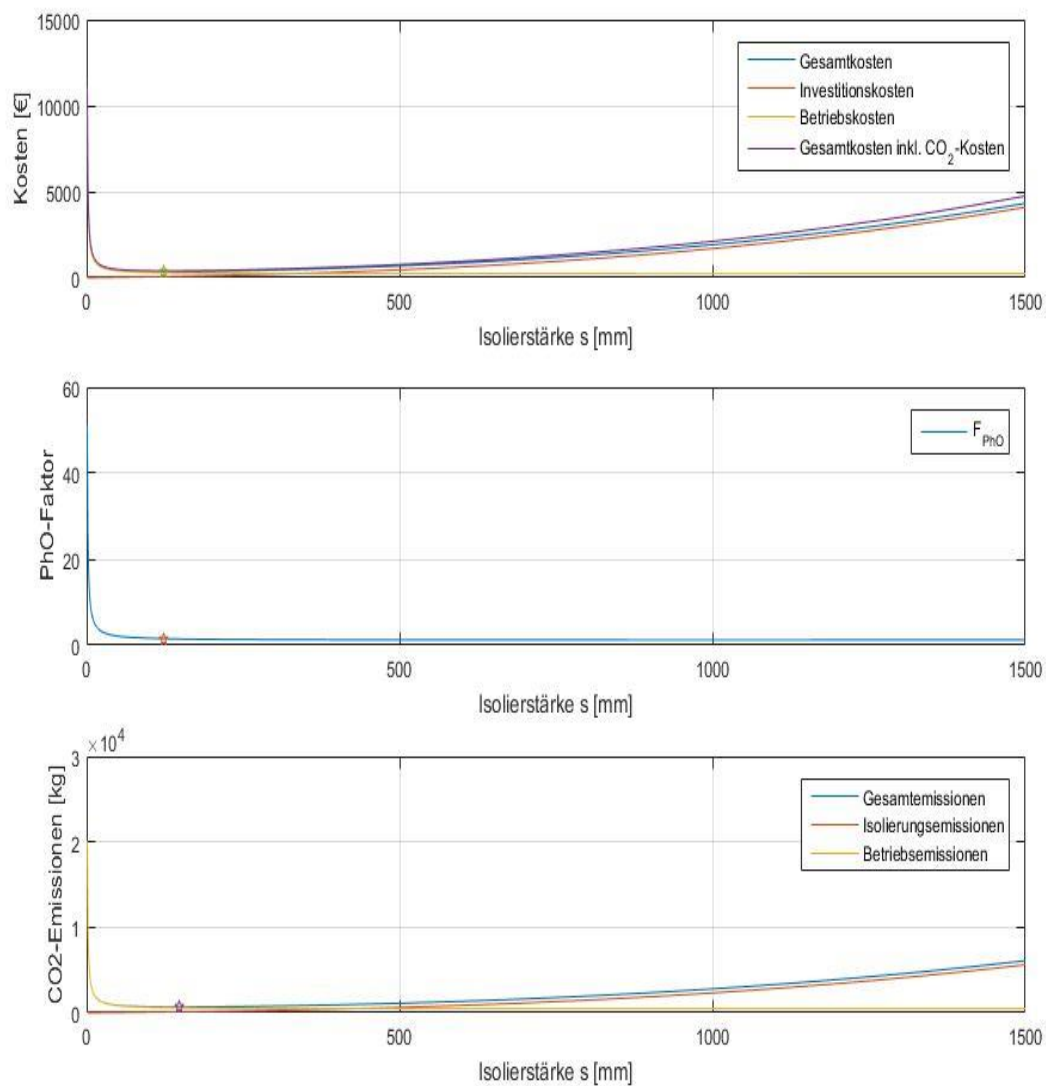


Abbildung 19-6: Einfluss der Isolierungstärke auf die Anlagenparameter

Von elementarer Bedeutung ist der Vergleich der berechneten Ergebnisse aus Kapitel 11 mit den Ergebnissen der auf Matlab basierenden Simulation. Dieser Schritt dient der Ergebniskontrolle und zur Bestätigung der entwickelten Gleichungen. Das Simulationsschema (Abbildung 19-2) soll helfen, den Simulationsablauf innerhalb des Programms nachzuvollziehen.

Tabelle 19-3: Ergebnisse Simulation 5 Jahre, Teil 1

Laufzeit 5 Jahre	Isolierstärke [mm]	Betriebsverbrauch [kWh]	Kosten Betrieb [€]	Kosten Isolierung [€]	CO ₂ -Emissionen Betrieb [kg]	CO ₂ -Emissionen Isolierung [kg]
PhO-Optimum		3666,94				
PhO-Minimum	1000	4402,78	1203,81	1690,00	2355,49	2316,60
BwO-Optimum	237	4854,66	1327,36	143,16	2597,24	196,24
BwO-Optimum inkl. CO ₂	240	4845,51	1324,86	145,72	2592,35	199,74
CF-Optimum	269	4768,21	1303,73	171,47	2550,99	235,05

Tabelle 19-4: Ergebnisse Simulation 5 Jahre, Teil 2

Laufzeit 5 Jahre	Gesamte Emissionen CO ₂ [kg]	Gesamtkosten [€]	BwO Faktor	PhO-Faktor	CF-Faktor
PhO-Optimum				1,00	
PhO-Minimum	4672,09	2.893,81	1,97	1,20	1,68
BwO-Optimum	2793,49	1.470,53	1,00	1,32	1,00
BwO-Optimum inkl. CO ₂	2792,09	1.470,58	1,00	1,32	1,00
CF-Optimum	2786,04	1.475,20	1,00	1,30	1,00

Tabelle 19-5: Ergebnisse Simulation 10 Jahre, Teil 1

Laufzeit 10 Jahre	Isolierstärke [mm]	Betriebsverbrauch [kWh]	Kosten Betrieb [€]	Kosten Isolierung [€]	CO ₂ -Emissionen Betrieb [kg]	CO ₂ -Emissionen Isolierung [kg]
PhO-Optimum		7333,87				
PhO-Minimum	1000	8805,55	2599,35	1690,00	4710,97	2316,60
BwO-Optimum	310	9370,61	2766,15	211,35	5013,27	289,71
BwO-Optimum inkl. CO ₂	313	9360,33	2763,12	214,43	5007,78	293,94
CF-Optimum	340	9276,92	2738,50	243,21	4963,15	333,38

Tabelle 19-6: Ergebnisse Simulation 10 Jahre, Teil 2

Laufzeit 10 Jahre	Gesamte Emissionen CO ₂ [kg]	Gesamtkosten [€]	BwO Faktor	PhO-Faktor	CF-Faktor
PhO-Optimum				1,00	
PhO-Minimum	7027,57	4.289,35	1,44	1,20	1,33
BwO-Optimum	5302,99	2.977,50	1,00	1,28	1,00
BwO-Optimum inkl. CO ₂	5301,71	2.977,55	1,00	1,28	1,00
CF-Optimum	5296,53	2.981,71	1,00	1,26	1,00

Tabelle 19-7: Ergebnisse Simulation 20 Jahre, Teil 1

Laufzeit 20 Jahre	Isolierstärke [mm]	Betriebsverbrauch [kWh]	Kosten Betrieb [€]	Kosten Isolierung [€]	CO ₂ -Emissionen Betrieb [kg]	CO ₂ -Emissionen Isolierung [kg]
PhO-Optimum		14667,74				
PhO-Minimum	1000	17611,10	6092,67	1690,00	9421,94	2316,60
BwO-Optimum	407	18246,87	6312,62	322,99	9762,08	442,75
BwO-Optimum inkl. CO ₂	408	18243,18	6311,34	324,28	9760,10	444,51
CF-Optimum	422	18193,65	6294,20	342,56	9733,60	469,58

Tabelle 19-8: Ergebnisse Simulation 20 Jahre, Teil 2

Laufzeit 20 Jahre	Gesamte Emissionen CO ₂ [kg]	Gesamtkosten [€]	BwO Faktor	PhO-Faktor	CF-Faktor
PhO-Optimum				1,00	
PhO-Minimum	11738,54	7.782,67	1,17	1,20	1,15
BwO-Optimum	10204,83	6.635,61	1,00	1,24	1,00
BwO-Optimum inkl. CO ₂	10204,61	6.635,62	1,00	1,24	1,00
CF-Optimum	10203,18	6.636,77	1,00	1,24	1,00

Tabelle 19-9: Ergebnisvergleich

Bezeichnung	Ergebnis Matlab-simulation Isolierstärke [mm]	Ergebnis Berechnung Kapitel 10 Isolierstärke [mm]	Abweichungen Simulation/ Berechnung [%]
PhO-Optimum 5a	1000	1000	0
BwO-Optimum 5a	237	237	0
CFO-Optimum 5a	269	269	0
PhO-Optimum 10a	1000	1000	0
BwO-Optimum 10a	310	310	0
CFO-Optimum 10a	340	340	0
PhO-Optimum 20a	1000	1000	0
BwO-Optimum 20a	407	407	0
CFO-Optimum 20a	422	422	0

Tabelle 19-9 zeigt die Ergebnisse des Programms und die der händischen Rechnung, berechnet über die entwickelten Gleichungen. Die Isolationsstärken wurden immer auf die ganzen Zahlen gerundet. Anschließend erfolgte eine prozentuale Abweichungsanalyse zwischen den Ergebnissen. Es ist festzustellen, dass die Ergebnisse optimal zueinander passen.

In Abbildung 19-7 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse über die Betriebslaufzeit eingetragen. Die logarithmische Grafik verdeutlicht die Dominanz der physikalischen Betrachtung. Während die optimale Isolierstärke nach dem PhO konstant bei 1000 mm verharrt, steigert sich die Isolierstärken nach dem BwO von 124 mm auf 407 mm über die Betriebslaufzeit.

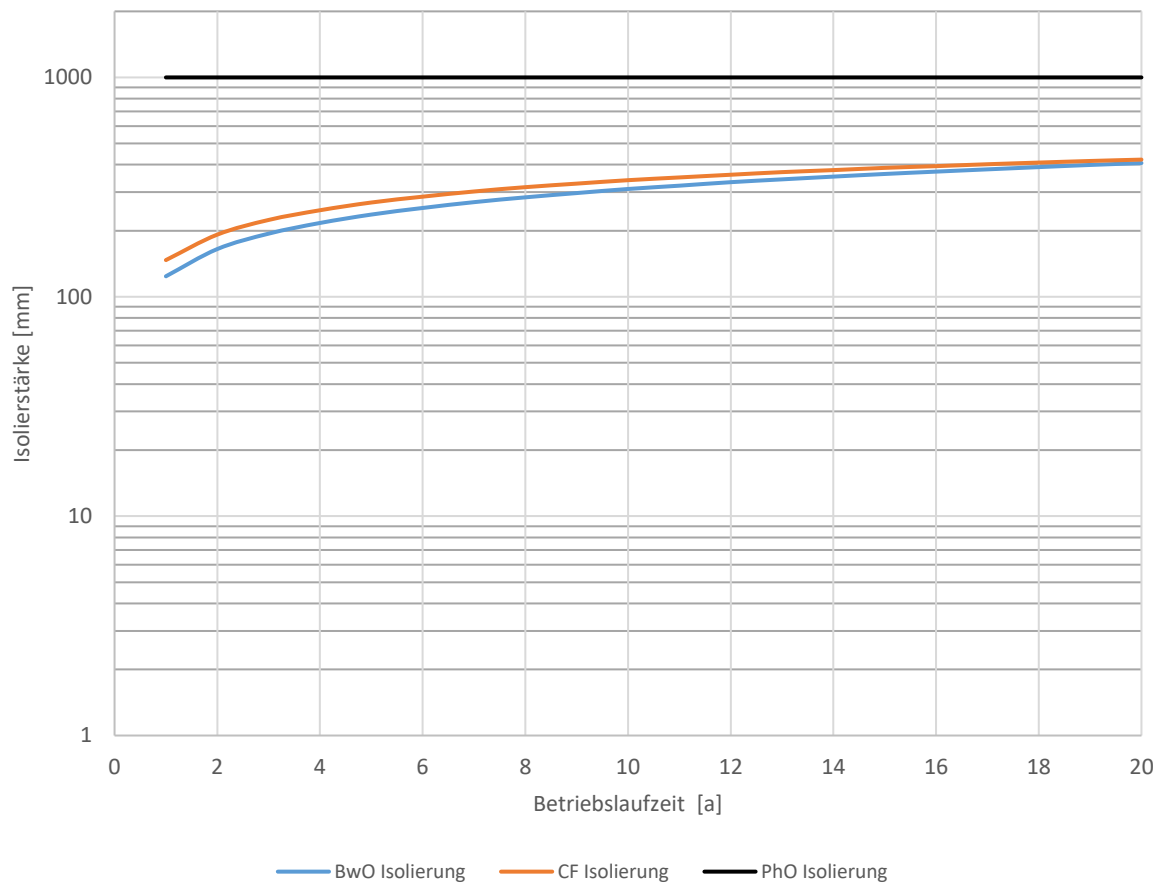


Abbildung 19-7: Optimale Isolierungsstärke in Abhängigkeit der Betriebslaufzeit

B. HERLEITUNG PHO

Die Gleichungen zur Analyse der optimalen Isolierstärke nach dem Physikalischen Optimum können über den Verbrauch oder die Leistung eines Systems analysiert werden. Eine zeitimplizierende Betrachtung der Verbräuche hat keinen Einfluss auf das Ergebnis der Analyse. Dies soll in diesem Abschnitt rechnerisch belegt werden.

Berechnung der optimalen Isolierstärke über den Verbrauch in der Betriebsphase:

$$V_{sys(s)}^B = [\dot{Q}_{nutz} + \dot{Q}_{verl(s)}] \cdot n$$

$$V_{sys(s)}^B = \left[\dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right] \cdot n$$

Anschließend wird die Funktion nach s abgeleitet und der Extrempunkt bestimmt. An diesem Punkt ist die Steigung der Funktion gleich null (Minimum der Funktion):

$$f_{(s)} = \left[\dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right] \cdot n$$

$$f'_{(s)} = \left[\dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right] \cdot n \cdot \frac{d}{ds}$$

$$f'_{(s)} = \frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot (s^2 - l^2) \cdot n}{s^2}$$

Umstellen der Ableitung nach der Isolierstärke im Extrempunkt der Funktion:

$$f'_{(s)} = 0 = \frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot s^2 \cdot n - 6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot l^2 \cdot n}{s^2}$$

$$0 = \frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot s^2 \cdot n}{s^2} - \frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot l^2 \cdot n}{s^2}$$

$$0 = 6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot t - \frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot l^2 \cdot t}{s^2}$$

$$-6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot t = -\frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot l^2 \cdot t}{s^2}$$

$$6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot t \cdot s^2 = 6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot l^2 \cdot t$$

$$s^2 = \frac{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot l^2 \cdot t}{6 \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot t}$$

$$s^2 = l^2$$

$$s = l$$

Zu null gesetzt und nach s aufgelöst ergibt:

$$s_{phO} = 1000 \text{ mm}$$

Somit ergibt sich, dass die physikalisch optimale Isolierung ausschließlich von der Kantenlänge des Wärmewürfels abhängig ist. Die Betriebslaufzeit, Wärmeleitfähigkeit und

Temperaturdifferenz müssen der ansteigenden wärmeabgebenden Oberfläche Tribut zollen.

C. HERLEITUNG BWO

Um die Anwendung der Gleichung (8-8) zu verdeutlichen, wird diese noch einmal detailliert berechnet:

$$TZ_{Faktor} = \frac{((TR + 1)^n - 1) \cdot (TR + 1)}{(n \cdot TR)}$$

$$TZ_{Faktor} = \frac{((0,03 + 1)^{20} - 1) \cdot (0,03 + 1)}{(20 \cdot 0,03)}$$

$$TZ_{Faktor} = 1,38382$$

Direkter Vergleich mit dem Originalterm aus der Kapitalwertgleichung (siehe Gleichung (3-18) und (8-5)):

$$TZ_{Faktor} = \sum_{t=1}^n [(1 + TR)^t] \cdot \frac{1}{n}$$

$$TZ_{Faktor} = \sum_{t=1}^{20} [(1 + 0,03)^t] \cdot \frac{1}{20} = 1,38382$$

Basis der Analyse ist die entwickelte Gleichung (8-10) aus dem Kapitalwert, Kapitel 8.

$$C_0 C = A_0 + K_{OK} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc}$$

Anschließend wird der Kurvenverlauf positiv bewertet, um den geringsten Extrempunkt zu definieren. Eine Überprüfung, ob es sich um einen Extrempunkt im Minimum der Funktion handelt, findet über die Monotonietabelle statt (Tabelle 19-10).

$$f'_{(s)} = [A_0(s) + \{K_{BSK}(s)\} \cdot n \cdot TZ_{Faktor} \cdot Z_{Faktor} + K_{Recyc}(s)] \frac{d}{ds}$$

$$f'_{(s)} = \left[([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_l + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WWaus} - T_{WWein}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WWaus} - T_{Umg}) \right\} \cdot k_{el} \cdot n \right. \\ \left. \cdot TZ_{Faktor} + ([l + 2s]^3 - l^3) \cdot k_{Recyc} \right] \frac{d}{ds}$$

$$f'_{(s)} = \left[\frac{(24\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^4)}{s^2} + \frac{24l\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^3}{s^2} + 6\{\Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + l^2 \cdot (k_i + k_{Recyc})\} \right. \\ \left. - \frac{6l^2 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n}{s^2} \right]$$

$$f'_{(x)} = 24\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^2 + 24l\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s + 6 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + 6 \cdot l^2 \cdot (k_i + k_{Recyc}) \\ - \frac{6l^2 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n}{s^2}$$

Eingebunden wird der Umrechnungsfaktor für die Energiekosten. Der Umrechnungsfaktor ist erforderlich durch die Kostenumrechnung von €/kWh in €/Wh:

$$\begin{aligned}
f'_{(x)} &= 24\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s^2 + 24l\{k_i + k_{Recyc}\} \cdot s + 6 \cdot \Delta T \cdot \frac{k_{el}}{\frac{1000 \text{ Wh}}{\text{kWh}}} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + 6l^2 \cdot (k_i + k_{Recyc}) \\
&\quad - \frac{6l^2 \cdot \Delta T \cdot \frac{k_{el}}{1000 \text{ Wh/kWh}} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n}{s^2} \\
&= s^2 \cdot (4000 \cdot \{k_i + k_{Rec}\} \cdot s^2 + 4000 \cdot l \cdot \{k_i + k_{Rec}\} \cdot s + \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n + 1000 \cdot l^2 \cdot \{k_i + k_{Rec}\}) \\
&= l^2 \cdot \Delta T \cdot k_{el} \cdot \lambda \cdot TZ_{Faktor} \cdot n
\end{aligned}$$

Mit den eingesetzten Werten aus Tabelle 19-1 ergibt sich folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}
s^2 \cdot \left(4000 \cdot \left\{ \frac{50 \text{ €}}{\text{m}^3} + \frac{15 \text{ €}}{\text{m}^3} \right\} \cdot s^2 + 4000 \cdot 1 \text{ m} \cdot \left\{ \frac{50 \text{ €}}{\text{m}^3} + \frac{15 \text{ €}}{\text{m}^3} \right\} \cdot s + 20 \text{ K} \cdot \frac{0,25 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot \frac{0,035 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot 1,38382 \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \right. \\
\left. \cdot 20 \text{ a} + 1000 \cdot (1 \text{ m})^2 \cdot \left\{ \frac{50 \text{ €}}{\text{m}^3} + \frac{15 \text{ €}}{\text{m}^3} \right\} \right) \\
= (1 \text{ m})^2 \cdot 20 \text{ K} \cdot 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \frac{0,035 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot 1,38382 \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} \\
s_1 = -0,8014 \text{ m} \\
s_2 = 0,407 \text{ m}
\end{aligned}$$

Eine negative Isolierstärke kann ausgeschlossen werden. Zusätzlich wurde in Kapitel 11 eine Kostenanalyse der beiden absoluten Isolationsstärken durchgeführt. Die Isolierstärke s_2 konnte ihr Optimum belegen.

Eine Analyse über das Verfahren der Monotonietabelle kann ein relatives Minimum überprüfen. Dafür wird die Steigung des Graphen über die Ableitung der Funktion berechnet.

Tabelle 19-10: Monotonietabelle BwO-Analyse

Beschreibung	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Einheit
Systemvariable SV	0,400	0,407	0,415	m
Steigung der Funktion	-72,88	≈ 0	82,53	

Die Steigung vor dem Systemvariablenergebnis (Wert 1; $SV = 0,4 \text{ m}$) aus der BwO-Analyse ist negativ, was auf einen fallenden Verlauf der Funktion hindeutet. Nach der Systemvariable ist eine positive Steigung zu bilanzieren (Wert 3; $SV = 0,415 \text{ m}$). Somit kann ein relatives Minimum als lokales Extrema der Funktion bestätigt werden (Wert 2; $SV = 0,407 \text{ m}$).

D. HERLEITUNG CFO

Grundlage der Herleitung ist die Gleichung (5-3):

$$CF_{sys(s)} = CF_{Herst(s)} + CF_{Distr(s)} + CF_{Bet(s)} + CF_{Recyc(s)}$$

Die Treibhausgasemissionen für die Isolierung werden aus Tabelle 19-1 entnommen und die isolationsvolumenabhängigen Parameter zusammengefasst:

$$CF_{sys(CFO)} = \{cf_{Herst(s)} + cf_{Distr(s)} + cf_{Recyc(s)}\} \cdot V_{iso} + CF_{Betr(s)}$$

$$\begin{aligned}
CF_{sys(CFO)} &= \{cf_{Herst(s)} + cf_{Distr(s)} + cf_{Recyc(s)}\} \cdot ([l + 2s]^3 - l^3) + cf_{Betr(s)} \\
&\cdot \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WWaus} - T_{WWein}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WWaus} - T_{umg}) \right\} \cdot n \\
f'_{(s)} &= \left[\{cf_{Herst(s)} + cf_{Distr(s)} + cf_{Recyc(s)}\} \cdot ([l + 2s]^3 - l^3) + cf_{Betr(s)} \right. \\
&\cdot \left. \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WWaus} - T_{WWein}) + \frac{\lambda}{s} \cdot 6 \cdot (l + s)^2 \cdot (T_{WWaus} - T_{umg}) \right\} \cdot n \right] \frac{d}{ds}
\end{aligned}$$

Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die fixen spezifischen CO₂-äquivalenten Emissionen der Isolierung zusammengefasst:

$$\begin{aligned}
cf_{Iso} &= cf_{Herst(s)} + cf_{Distr(s)} + cf_{Recyc(s)} \\
f'_{(s)} &= 24 \cdot cf_{Iso} \cdot s^2 + 24 \cdot l \cdot cf_{Iso} \cdot s + 6 \cdot l^2 \cdot cf_{Iso} + 6 \cdot n \cdot cf_{Betr} \cdot \Delta T \cdot \lambda - \frac{l^2}{s^2} \\
s^2(4 \cdot cf_{Iso} \cdot s^2 + 4 \cdot l \cdot cf_{Iso} \cdot s^1 + n \cdot cf_{Betr} \cdot \Delta \cdot \lambda + l^2 \cdot cf_{Iso}) &= l^2 \cdot n \cdot cf_{Betr} \cdot \Delta T \cdot \lambda \\
s^2 \left(4 \cdot 89,1 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}^3} \cdot s^2 + 4 \cdot 1 \text{ m} \cdot 89,1 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}^3} \cdot s^1 + 20 \text{ a} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot \frac{0,535 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}}{\frac{1000 \text{ Wh}}{\text{kWh}}} \cdot 20 \text{ K} \cdot 0,035 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right. \\
&\left. + (1 \text{ m})^2 \cdot 89,1 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 \right) = (1 \text{ m})^2 \cdot 20 \text{ a} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot \frac{0,535 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}}{\frac{1000 \text{ Wh}}{\text{kWh}}} \cdot 20 \text{ K} \cdot 0,035 \text{ W/mK} \\
s_{CFO} = SV_{CFO} &= 422 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Tabelle 19-11: Monotonietabelle CFO-Analyse

Beschreibung	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Einheit
Systemvariable SV	0,410	0,422	0,430	m
Steigung der Funktion	-177,42	≈ 0	114	

Über die Monotonietabelle kann das Ergebnis von 0,422 m bestätigt werden. Die Begründung ist analog zur Monotonietabelle der BwO-Analyse (Tabelle 19-10).

E. HERLEITUNG WECHSELWIRKUNG PHO UND BWO

Die Berechnung des Kompromisspunktes wird detailliert beschrieben. Die eingesetzten Daten stammen aus Tabelle 19-1. Grundlage der Herleitung ist die Gleichung (10-1).

$$\begin{aligned}
F_{ANKP} &= \frac{F_{BWO_{KP}}}{F_{PhO_{KP}}} \\
F_{ANKP} \cdot F_{PhO_{KP}} &= F_{BWO_{KP}} \\
F_{ANKP} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B} \right) &= \frac{C_O C_{KP}}{C_O C_{BWO}} \\
C_O C_{BWO} \cdot F_{ANKP} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B} \right) &= C_O C_{KP} \\
C_O C_{BWO} \cdot F_{ANKP} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B} \right) &= K_{IKP} + K_{Recyc_{KP}} + K_{OK_{KP}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} + \frac{C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B} &= K_{I_{KP}} + K_{Recyc_{KP}} + K_{OK_{KP}} \\
C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} + \frac{C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot \frac{\lambda}{S} \cdot (l+s)^2 \cdot 6 \cdot \Delta T \cdot n}{V_{PhO}^B} \\
&= ([l+2s]^3 - l^3) \cdot (k_I + k_{Recyc}) \\
&\quad + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{W_{Aus}} - T_{W_{Ein}}) + \frac{\lambda}{S} \cdot 6 \cdot (l+s)^2 \cdot (T_{W_{Aus}} - T_{umg}) \right\} \cdot k_{el} \cdot n \\
0 &= ([l+2s]^3 - l^3) \cdot (k_I + k_{Recyc}) + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{Aus}} - T_{WW_{Ein}}) + \frac{\lambda}{S} \cdot 6 \cdot (l+s)^2 \cdot (T_{WW_{Aus}} - T_{umg}) \right\} \\
&\quad \cdot k_{el} \cdot t \cdot TZ_F - C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} - \frac{C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot \frac{\lambda}{S} \cdot (l+s)^2 \cdot 6 \cdot \Delta T}{V_{PhO}^B}
\end{aligned}$$

Eingesetzt mit den Tabellenwerten und der Kompromisspunktdefinition für das PhO und BwO nach Gleichung (10-5) ergibt sich der folgende Term. In Abschnitt 10.3 wird ausführlich erläutert, warum Gleichung (10-2) zu einem Fehler führen würde.

$$\begin{aligned}
0 &= ([1 \text{ m} + 2s]^3 - (1 \text{ m})^3) \cdot \frac{65 \text{ €}}{\text{m}^3} \\
&\quad + \left\{ 0,001 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{4,1868 \text{ kJ}}{\text{kgK}} \cdot 20 \text{ K} + \frac{0,035 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot 6 \cdot (1 \text{ m} + s)^2 \cdot 20 \text{ K} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \right\} \cdot \frac{0,25 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot 20 \text{ a} \\
&\quad \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot 1,38382 - 6636,56 \text{ €} \cdot 0,890536 \\
&\quad - \frac{6636,56 \text{ €} \cdot 0,890536 \cdot \frac{0,035 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot (1 \text{ m} + s)^2 \cdot 6 \cdot 20 \text{ K}}{83,72 \text{ W}} \\
s_1 &= -0,040 \text{ m} \\
s_2 &= 0,770 \text{ m}
\end{aligned}$$

Die gegengeprüfte richtige Isolierstärke ist s_2 mit 770 mm.

Kompromiss mit dem CFO definieren ohne Gewichtung:

$$\begin{aligned}
SV_{BwO-PhO-CFO} &= \frac{SV_{BwO-PhO} + SV_{CFO}}{2} \\
SV_{BwO-PhO-CFO} &= \frac{0,722 \text{ m} + 0,422 \text{ m}}{2} \\
SV_{BwO-PhO-CFO} &= 596 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Die optimale Isolierstärke als Kompromisslösung liegt bei 596 mm.

F. WECHSELWIRKUNG MIT FALSCHEM ANLAGENFAKTOR

Sollte der Anlagenfaktor für die Wechselwirkung zwischen dem PhO und BwO fälschlicherweise nach Gleichung (10-2) eingebunden werden, ergeben sich deutliche Abweichungen in der Anlagenkonzeption.

Um das Verhalten der Analyse aus Abschnitt 11.2 mit einem falschen Anlagenfaktor für die Wechselwirkung zwischen dem PhO und BwO aufzuzeigen, wird eine Vergleichsrechnung basierend auf einem Anlagenfaktor von eins durchgeführt und das Ergebnis mit der korrekten Berechnung verglichen.

$$F_{AN_{PhO-BwO}} = F_{AN_{KP}} = 1$$

Der Anlagenfaktor für die Wechselwirkung von PhO und BwO wird weiterhin wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} F_{AN_{KP}} &= \frac{F_{BwO_{KP}}}{F_{PhO_{KP}}} \\ F_{AN_{KP}} \cdot F_{PhO_{KP}} &= F_{BwO_{KP}} \\ F_{AN_{KP}} \cdot \left(1 + \frac{V_{verl_{KP}}^B}{V_{PhO}^B}\right) &= \frac{C_O C_{KP}}{C_O C_{BwO}} \\ C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} + \frac{C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot \frac{\lambda}{S} \cdot (l+s)^2 \cdot 6 \cdot \Delta T \cdot n}{V_{PhO}^B} \\ &= ([l+2s]^3 - l^3) \cdot (k_I + k_{Recyc}) \\ &\quad + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{Aus}} - T_{WW_{Ein}}) + \frac{\lambda}{S} \cdot 6 \cdot (l+s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right\} \cdot k_{el} \cdot t \\ 0 &= ([l+2s]^3 - l^3) \cdot (k_I + k_{Recyc}) + \left\{ \dot{m}_W \cdot c_p \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{WW_{ein}}) + \frac{\lambda}{S} \cdot 6 \cdot (l+s)^2 \cdot (T_{WW_{aus}} - T_{umg}) \right\} \\ &\quad \cdot k_{el} \cdot t \cdot TZ_F - C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} - \frac{C_O C_{BwO} \cdot F_{AN_{KP}} \cdot \frac{\lambda}{S} \cdot (l+s)^2 \cdot 6 \cdot \Delta T}{V_{PhO}^B} \end{aligned}$$

Mit eingesetzten Werten aus Tabelle 19-1:

$$\begin{aligned} 0 &= ([1 \text{ m} + 2 \text{ s}]^3 - (1 \text{ m})^3) \cdot \frac{65 \text{ €}}{\text{m}^3} \\ &\quad + \left\{ 0,001 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{4,1868 \text{ kJ}}{\text{kgK}} \cdot 20 \text{ K} + \frac{0,035 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot 6 \cdot (1 \text{ m} + s)^2 \cdot 20 \text{ K} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \right\} \cdot \frac{0,25 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot 20 \text{ a} \\ &\quad \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot 1,38382 - 6636,56 \text{ €} \cdot 1 - \frac{6636,56 \text{ €} \cdot 1 \cdot \frac{0,035 \text{ W}}{\text{mK}} \cdot (1 \text{ m} + s)^2 \cdot 6 \cdot 20 \text{ K}}{83,72 \text{ W}} \\ s_1 &= -0,050 \text{ m} \\ s_2 &= 1,050 \text{ m} \end{aligned}$$

Kompromisspunkt mit dem CFO definieren ohne Gewichtung:

$$\begin{aligned} SV_{BwO-PhO-CFO} &= \frac{SV_{BwO-PhO} + SV_{CFO}}{2} \\ SV_{BwO-PhO-CFO} &= \frac{1,050 \text{ m} + 0,422 \text{ m}}{2} \\ SV_{BwO-PhO-CFO} &= 736 \text{ mm} \end{aligned}$$

Die resultierende Anlagenisolierung liegt nun bei 736 mm und ist somit deutlich über der vorherigen Anlagendimensionierung. Die Anlagengestaltung wurde deutlich in Richtung des PhO verschoben.

Die wichtigsten Ergebnisse der beiden Anlagengestaltungen sind in Tabelle 19-12 zusammengefasst.

Tabelle 19-12: Ergebnisse Anlagenfaktorfehler

Wert	Anlagenfaktor BwO-PhO = 1	Anlagenfaktor BwO-PhO = 0,8905	Einheit	Abweichung in Prozent
$s_{BwO-PhO-CFO}$	736	596	mm	23,50 %
$F_{PhOBwO-PhO-CFO}$	1,206	1,215	-	0,74 %
$F_{BwOBwO-PhO-CFO}$	1,060	1,022	-	3,71 %
$F_{ANBwO-PhO-CFO}$	0,879	0,841	-	4,45 %
$F_{CFOBwO-PhO-CFO}$	1,050	1,013	-	3,56 %

G. ZUSATZBEISPIEL ROHRLEITUNGSDIMENSIONIERUNG

Die entwickelte Wechselwirkungsanalyse aus Kapitel 10 soll in einem zusätzlichen Beispiel bestätigt werden. Ziel der Analyse ist eine Rohrleitungsdimensionierung unter ökonomischen und ökologischen Randbedingungen. Anschließend wird ein Kompromisspunkt definiert. Die Randparameter und Gleichungen für die Strömungsberechnungen entstammen dem VDI Wärmeatlas.⁴⁷

Betrachtet wird eine Rohrleitung über eintausend Meter Länge durch die Wasser strömt (Randparameter Tabelle 19-13). Der Volumenstrom in der Leitung ist durch den Bedarf des anschließenden Produktionsprozesses festgelegt.

Der Wirkungsgrad der Fluidförderpumpe wird ideal deklariert, somit entspricht die hydraulische Leistung der elektrischen Leistung und dem Leistungsbedarf.

$$\dot{V}^B = P_{el} = \frac{P_{hyd.}}{\eta_{Pumpe}} \quad (19-1)$$

$$P_{hyd} = \Delta p \cdot \dot{V} \quad (19-2)$$

Die Energie des Druckverlustes wird bei einem inkompressiblen Medium ausschließlich in Dissipationswärme umgewandelt, welche teilweise im Medium verbleibt oder durch die Rohrwandungen an die Umgebung abgegeben wird (Abbildung 19-8).

$$\dot{Q}_{Diss} = \dot{Q}_{Medium} + \dot{Q}_{Umg} \quad (19-3)$$

⁴⁷ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (2006), S. 4

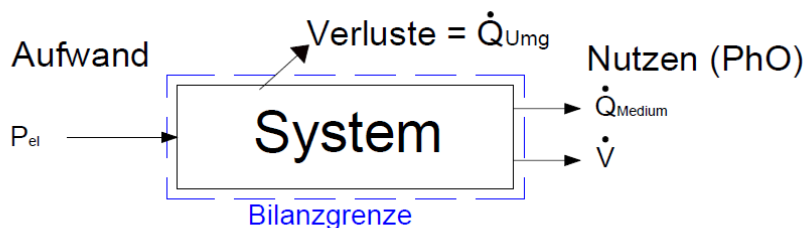


Abbildung 19-8: Bilanzgrenze Rohrleitung

Die grundlegenden Gleichungen für den Druckverlust in der Rohrleitung kommen aus dem Anhang Kapitel IV und werden dort ausführlich erläutert.

Tabelle 19-13: Randparameter Wechselwirkung Rohrleitung

Randwerte für die Wechselwirkungsanalyse Rohrleitung			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
Dichte bei (20°C, 1bar)	$\bar{\rho}$	998,21	kg/m ³
Dynamische Viskosität (20°C, 1bar)	$\bar{\eta}$	1001,60	*10 ⁻⁶ kg/ms
Volumenstrom	\dot{V}	14,137	m ³ /h
Absolute Rauigkeit, PhO	K_{PhO}	0,00075	
Absolute Rauigkeit Stahlrohr, gezogen	$K_{St. Rohr}$	0,15	
Leitungslänge	l	1000	m
Spezifische Kosten Strom	k_{el}	0,25	€/kWh
Innendurchmesser Rohr	d_i	unbekannt	m
Simulationslaufzeit	n	175200	h
Widerstandsbeiwert PhO, abgelesen	ζ_{PhO}	0,027	
CF Belastung Herstellung Rohr	cf_{Rohr}	2,255	kg CO ₂ -äq/kg
CF Belastung Betriebsstoff Strom	cf_{el}	0,535	kg CO ₂ -äq/kWh

Die Rauigkeitswerte stammen aus dem VDI Wärmeatlas (2006) Kapitel Lab 2. Die Zeta-Werte wurden aus dem Diagramm von Hausen abgelesen (Kapitel Lab 3). Die Emissionsaufwendungen für die Rohrleitungen entstammen dem VDI 4600 Blatt 1.⁴⁸

Die Gewichte und die Preise kommen aus der Preisliste von RM-Stahlhandel GmbH (2008).⁴⁹ Die Leitungsdimensionierung wird auf einen maximalen Querschnitt von ca. 250 mm begrenzt. Alle resultierenden Strömungsparameter sind in Tabelle 19-14 vermerkt.

⁴⁸ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4600 Blatt 1 (2015), S. 76

⁴⁹ Vgl. RM-Stahlhandel GmbH (2008), S. 5

Tabelle 19-14: Strömungsparameter Rohrleitungen

Nenn-durch-messer	Rohr-durch-messer innen d_i [m]	Freie Fläche A [m ²]	Geschwin-digkeit im Rohr u [m/s]	Relative Rauigkeit ϵ	Reynolds-Zahl Re	Zeta abgelesen ζ	Ge-wicht m [kg/m]	Spezifi-scher Rohr-preis k_{Rohr} [€/m]
DN 15	0,016	0,000201062	19,53	0,009375000	311442,32	0,038	0,89	11,20
DN 20	0,021	0,000346361	11,34	0,007142857	237289,39	0,034	1,13	9,00
DN 25	0,0262	0,000539129	7,28	0,005725191	190193,78	0,030	1,87	13,60
DN 32	0,0324	0,000824480	4,76	0,004629630	153798,68	0,028	2,27	15,50
DN 40	0,0429	0,001445455	2,72	0,003496503	116155,64	0,027	2,93	18,30
DN 50	0,0512	0,002058874	1,91	0,002929688	97325,72	0,026	3,87	24,00
DN 65	0,0672	0,003546732	1,11	0,002232143	74152,93	0,026	5,01	31,20
DN 80	0,0825	0,005345616	0,73	0,001818182	60400,93	0,025	6,76	38,40
DN 100	0,1071	0,009008839	0,44	0,001400560	46527,33	0,025	9,83	55,80
DN 125	0,1317	0,013622645	0,29	0,001138952	37836,58	0,025	13,4	76,00
DN 150	0,1593	0,019930649	0,20	0,000941620	31281,09	0,025	18,2	112,70
DN 200	0,2065	0,033491145	0,12	0,000726392	24131,12	0,027	33,1	204,80
DN 250	0,2544	0,050830466	0,08	0,000589623	19587,57	0,027	40,5	250,50
Minimum	0,0160	0,000201062	0,08	0,000589623	19587,57	0,025	0,89	9,00
Maximum	0,2544	0,050830466	19,53	0,009375000	311442,32	0,038	40,5	250,50
Mittelwert	0,0922	0,010860881	3,88	0,003242026	107701,78	0,028	10,75	66,23

Die Leitungsdimensionierung soll über die Wechselwirkungsanalyse durchgeführt werden (Kapitel 10). Die abhängige Variable für die ökologische und ökonomische Anlagenkonzeption wird durch den inneren Durchmesser der Rohrleitung gegeben. Alle Gleichungen müssen nach der Systemvariable SV auflösbar gestaltet werden.

H. ROHRLEITUNGSDIMENSIONIERUNG NACH DEM PHO

Physikalisch Optimal ist eine Rohrleitungsgestaltung mit einem maximalen Innendurchmesser ($d_i = \infty$). Zwar steigt der Zeta-Wert im Bereich der laminaren Strömung an, trotzdem wirkt sich die Strömungsgeschwindigkeitsreduktion senkend auf den Energiebedarf aus mit Erhöhung des freien Querschnitts. Durch eine maximale Querschnittsbegrenzung auf den Nenndurchmesser DN 250 wird das Physikalische Optimum auf dem Maximalwert festgelegt. Die relative Rauigkeit für das PhO wird aus der Grafik von Hausen für ideal glatte Rohre entnommen.

Die physikalische Wirkleistung berechnet sich nach Gleichung (19-6). Kombiniert mit Gleichung (19-9) ergibt sich der folgende Term:

$$\dot{V}^B = \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2} \right)^2}{2} \cdot \dot{V}$$

$$\dot{V}_{PhO}^B = 1,24 \text{ W}$$

Durch die gesetzten Begrenzungen ergibt sich der PhO-Faktor zu eins:

$$F_{PhO_{PhO}} = f_{PhO_{PhO}} = 1$$

Die Kosten für eine Anlagengestaltung nach dem PhO werden nach Gleichung (8-10) berechnet. Es werden keine Teuerungen oder barwertige Verzinsungen betrachtet. Ebenfalls fließen nur die Energiekosten ohne eine Wirkungsgradberücksichtigung der Fluidpumpe in die Bilanzierung mit ein. Es wird angenommen, dass die ökonomischen und ökologischen Aufwendungen am EoL durch das Recycling des Stahls aufgehoben werden.

$$C_0 C_{PhO} = k_{250} \cdot l + \dot{V}_{PhO}^B \cdot n \cdot k_{el}$$

$$C_0 C_{PhO} = 210.554,31 \text{ €}$$

Die Emissionsaufwendungen berechnen sich analog zu den betriebswirtschaftlichen Aufwendungen:

$$CF_{PhO} = cf_{Rohr} \cdot m_{250} \cdot l + \dot{V}_{PhO}^B \cdot n \cdot cf_{el}$$

$$CF_{PhO} = 91.443,73 \text{ kg CO}_2$$

Das BwO kann noch nicht definiert werden und wird in Kapitel III Abschnitt i berechnet.

I. ROHRLEITUNGSDIMENSIONIERUNG NACH DEM BWO

Die Berechnung der optimalen Anlage nach dem BwO erfolgt nach Kapitel 8.3. Problematisch gestalten sich dabei die abgelesenen Kennwerte aus der Grafik nach Hausen⁵⁰ und die Tabellenwerte der RM Stahlhandel GmbH⁵¹. Die Kennwerte müssen über Ersatzgleichungen mathematisch beschreibbar sein, damit sie in eine Abhängigkeit zur Laufvariable d_i gesetzt werden können. In Abbildung 19-9 ist der Zeta-Wert und die Reynolds-Zahl über den inneren Durchmesser dargestellt. Die Ausgleichsgerade beschreibt annähernd das Verhalten in dem relevanten Bereich der Rohrströmung. Somit kann die Verbrauchsgleichung folgend vereinfacht werden:

$$\dot{V}_e^B = 0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2} \right)^2}{2} \cdot \dot{V}$$

In Abbildung 19-10 wurde der Rohrpreis und das Gewicht linear über den tatsächlichen Verlauf gelegt. Somit ergibt sich für die Investitionskosten die vereinfachte Gleichung:

$$A_{0,e} = 825,84 \cdot d_i \cdot l$$

⁵⁰ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (2006), S. 4

⁵¹ Vgl. RM-Stahlhandel GmbH (2008), S. 5

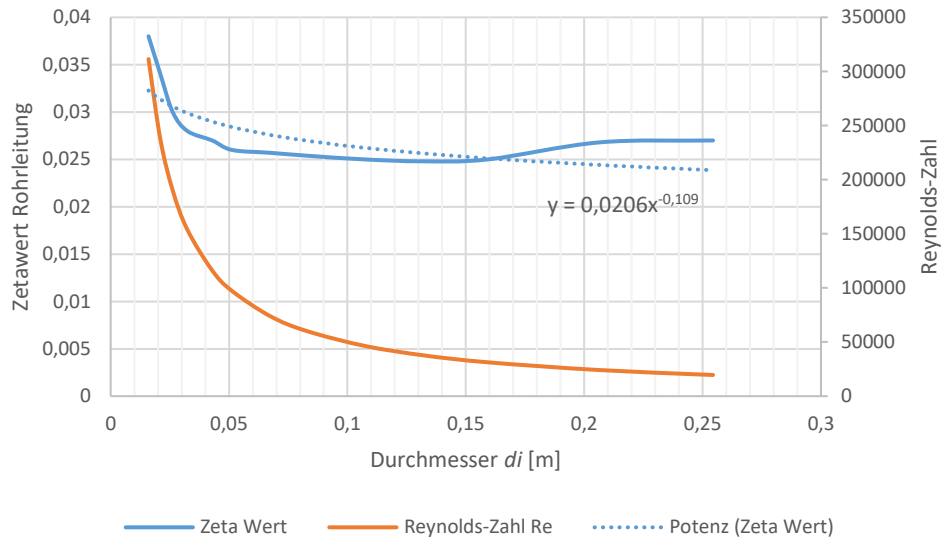


Abbildung 19-9: Zeta-Wert Rohrleitung in Abhängigkeit vom Durchmesser

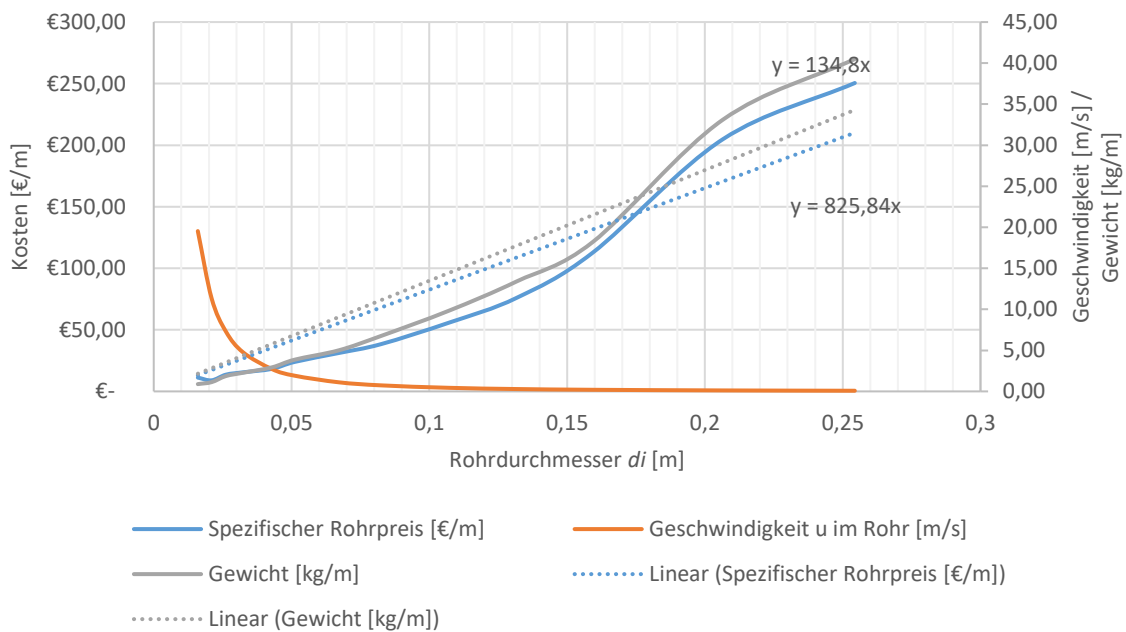


Abbildung 19-10: Geschwindigkeit, Gewicht und Kosten von Rohrleitungen in Abhängigkeit vom Durchmesser

Die Kostenfunktion verändert sich zu einer vereinfachten Funktion, die ausschließlich für die Analyse des Funktionsverlaufs genutzt werden sollte.

$$C_0 C_e = 825,84 \cdot d_i \cdot l + 0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2} \right)^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot n \cdot k_{el}$$

Die Kostengleichung muss nach der Laufvariable SV abgeleitet werden.

$$f'_{d_i} = \left[825,84 \cdot d_i \cdot l + 0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2} \right)^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot n \cdot k_{el} \right] \frac{d}{d d_i}$$

Anschließend wird die Ableitung zu null gesetzt und nach eins aufgelöst. Es ergibt sich der Graphenpunkt mit einer Steigung von null.

$$d_{i\ BwO,e} = 0,08\text{ m}$$

Die Stufungen der verfügbaren Rohrleitungen müssen berücksichtigt werden und somit ergibt sich ein einsetzbarer Nenndurchmesser von DN 80.

$$d_{i\ BwO} = 0,0825\text{ m}$$

Die Berechnungen der Kostenaufwendungen für den ermittelten Durchmesser und den Verbrauch erfolgen wieder nach den Originalformeln aus der Analyse zum PhO.

$$\dot{V}_{BwO}^B = 325,65\text{ W}$$

$$C_0 C_{BwO} = 82.395,42\text{ €}$$

$$CFO_{BwO} = 45.767,96\text{ kg CO}_2$$

Somit können die jeweiligen Faktoren für die Anlagenkonfiguration nach dem BwO berechnet werden:

$$F_{PhO_{BwO}} = f_{PhO_{BwO}} = \frac{\dot{V}_{BwO}^B}{\dot{V}_{PhO}^B} = \frac{325,65\text{ W}}{1,24\text{ W}}$$

$$F_{PhO_{BwO}} = f_{PhO_{BwO}} = 262,29$$

$$F_{BwO_{BwO}} = 1$$

$$F_{BwO_{PhO}} = \frac{CoC_{PhO}}{CoC_{BwO}} = \frac{210148,08\text{ €}}{82395,42\text{ €}}$$

$$F_{BwO_{PhO}} = 2,55$$

Berechnung des Anlagenfaktors für den Zustand des BwO:

$$F_{AN_{BwO}} = \frac{F_{BwO_{BwO}}}{F_{PhO_{BwO}}} = \frac{1}{262,29}$$

$$F_{AN_{BwO}} = 0,0038126$$

Berechnung des Anlagenfaktors für den Zustand PhO:

$$F_{AN_{PhO}} = \frac{F_{BwO_{PhO}}}{F_{PhO_{PhO}}} = \frac{2,55}{1}$$

$$F_{AN_{PhO}} = 2,55$$

Der große Einfluss der Analyse nach dem PhO ist deutlich zu erkennen.

J. ROHRLEITUNGSDIMENSIONIERUNG NACH DEM CFO

Die Analysen nach dem Carbon Footprint laufen analog zu den Ermittlungen aus der BwO-Untersuchung. Die Ausgleichsgerade für die eingesetzte Masse wird Abbildung 19-10 entnommen. Die Betriebsemissionen werden mithilfe der vereinfachten Verbrauchsgleichung analysiert.

$$m_e = 134,8 \cdot d_i$$

$$CF_{PhO} = cf_{Rohr} \cdot m_e \cdot l + \dot{V}_e^B \cdot n \cdot cf_{el}$$

$$CF_{PhO,e} = cf_{Rohr} \cdot 134,8 \cdot d_i \cdot l + 0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2} \right)^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot n \cdot cf_{el}$$

Nachdem die Gleichung aufgestellt wurde, erfolgt eine Ableitung nach der Laufvariable und eine anschließende Auflösung.

$$f'_{d_i} = \left[cf_{Rohr} \cdot 134,8 \cdot d_i \cdot l + 0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2} \right)^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot n \cdot cf_{el} \right] \frac{d}{d d_i}$$

$$d_{i\,CFO,e} = 0,11 \text{ m}$$

Die Stufungen der verfügbaren Rohrleitungen müssen berücksichtigt werden und somit ergibt sich ein einsetzbarer Nenndurchmesser von DN 100.

$$d_{i\,CFO} = 0,1071 \text{ m}$$

Die Berechnungen der Kostenaufwendungen für den ermittelten Durchmesser und den Verbrauch erfolgen wieder nach den Originalformeln aus der Analyse zum PhO.

$$\dot{V}_{CFO}^B = 86,93 \text{ W}$$

$$C_0 C_{CFO} = 92.255,13 \text{ €}$$

$$CF_{CFO} = 30.315,05 \text{ kg CO}_2$$

Somit können die jeweiligen Faktoren berechnet werden:

$$F_{PhO_{CFO}} = f_{PhO_{CFO}} = \frac{\dot{V}_{CFO}^B}{\dot{V}_{PhO}^B} = \frac{86,93 \text{ W}}{1,24 \text{ W}}$$

$$F_{PhO_{CFO}} = f_{PhO_{CFO}} = 70,02$$

$$F_{BwO_{CFO}} = \frac{C_0 C_{CFO}}{C_0 C_{BwO}} = \frac{92255,13 \text{ €}}{82395,42 \text{ €}}$$

$$F_{BwO_{CFO}} = 1,12$$

$$F_{CFO_{CFO}} = 1$$

Berechnung des Anlagenfaktors für den Zustand des BwO:

$$F_{AN_{CFO}} = \frac{F_{BWO_{CFO}}}{F_{PhO_{CFO}}} = \frac{1,12}{70,02}$$

$$F_{AN_{CFO}} = 0,016$$

K. KOMPROMISSPUNKT ROHRLEITUNG

Aus den drei unterschiedlichen Betrachtungen soll eine Kompromisslösung resultieren. Im ersten Schritt erfolgt eine Zusammenführung der Anlagenfaktoren PhO und BwO. Das Verfahren der Kompromissfindung wurde in Abschnitt 10.2 ausführlich beschrieben. Die Kontrollgleichungen (10-3) und (10-4) können nicht bestätigt werden und somit ist der Kompromisspunkt nach Gleichung (10-2) zu bestimmen:

$$F_{AN_{BWO-PhO}} = \frac{F_{BWO_{BWO-PhO}}}{F_{PhO_{BWO-PhO}}} = 1$$

$$F_{AN_{BWO-PhO}} = 1 = \frac{\frac{825,84 \cdot d_i \cdot l + 0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2}\right)^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot n \cdot k_{el}}{CoC_{BWO}}}{\frac{0,0206 \cdot d_i^{-0,109} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot [d_i]^2}\right)^2}{2} \cdot \dot{V}}{\dot{V}_{PhO}^B}}$$

Aufgelöst nach dem inneren Durchmesser ergibt sich die Kompromissdimensionierung zwischen dem PhO und dem BwO:

$$d_{i \text{ BWO-PhO}} = 0,21 \text{ m}$$

Der große Einfluss des PhO-Faktors sorgt für eine Kompromisspunktverschiebung zur Anlagenkonfiguration nach dem PhO. Wäre der maximale Querschnitt nicht auf den Nenndurchmesser DN 250 beschränkt gewesen, dann wäre die Lösung der Wechselwirkung weiter angestiegen.

Wird die Betrachtung des CFO mit der Anlagenkonfiguration nach der Wechselwirkung zwischen dem PhO und BwO erweitert, ergibt sich folgende Rohrleitungsdimensionierung.

$$F_{AN_{BWO-PhO-CFO}} = \frac{F_{AN_{PhO-BWO}} + F_{AN_{CFO}}}{2}$$

$$F_{AN_{BWO-PhO-CFO}} = \frac{1 + 0,016}{2} = 0,508$$

$$d_{i \text{ BWO-PhO-CFO}} = 0,19 \text{ m}$$

Beide Ergebnisse würden zu einer Rohrdimensionierung, in Abhängigkeit der vorhandenen Nenndurchmesser, von DN 200 führen.

Der übermäßige Einfluss des PhO-Faktors wird durch den Einsatz der Gleichung (10-15) reduziert und führt zu folgender Anlagenkonfiguration:

$$SV_{BwO-PhO-CFO} = \frac{SV_{BwO-PhO} + SV_{CFO}}{2}$$

$$SV_{BwO-PhO-CFO} = \frac{0,21 \text{ m} + 0,11 \text{ m}}{2}$$

$$SV_{BwO-PhO-CFO} = 0,16 \text{ m}$$

Die Stufungen der verfügbaren Rohrleitungen müssen berücksichtigt werden und somit ergibt sich ein einsetzbarer Nenndurchmesser von DN 150.

$$d_{i \text{ BwO-PhO-CFO}} = 0,1593 \text{ m}$$

Für die Kompromissfindung ergeben sich mit den originalen Gleichungen folgende Anlagenparameter:

$$F_{PhOBwO-PhO-CFO} = f_{PhOBwO-PhO-CFO} = \frac{\dot{V}_{BwO-PhO-CFO}^B}{\dot{V}_{PhO}^B} = \frac{11,94 \text{ W}}{1,24 \text{ W}}$$

$$F_{PhOBwO-PhO-CFO} = f_{PhOBwO-PhO-CFO} = 9,62$$

$$F_{BwOBwO-PhO-CFO} = \frac{CoC_{BwO-PhO-CFO}}{CoC_{BwO}} = \frac{132079,34 \text{ €}}{82395,42 \text{ €}}$$

$$F_{BwOBwO-PhO-CFO} = 1,60$$

$$F_{CFOBwO-PhO-CFO} = 1,39$$

Berechnung des Anlagenfaktors für den Zustand des BwO:

$$F_{ANBwO-PhO-CFO} = \frac{F_{BwOBwO-PhO-CFO}}{F_{PhOBwO-PhO-CFO}} = \frac{1,60}{9,62}$$

$$F_{ANBwO-PhO-CFO} = 0,163$$

Die vereinfachten Gleichungen mit dem Index e wurden ausschließlich für die Anlagendimensionierung eingesetzt.

L. ERGEBNISSE ALLER ROHRLEITUNGSQUERSCHNITTE

Die Berechnungsergebnisse aller Querschnitte werden tabellarisch gegenübergestellt. Die Ergebnisse der vereinfachten Gleichungen sind farbig unterlegt und mit dem Index e versehen (Tabelle 19-15). Die jeweiligen Faktoren der einzelnen Rohrleitungsdimensionierungen sind in Tabelle 19-16 hinterlegt. In derselben Tabelle befinden sich die Carbon-Footprint-Aufwendungen.

Tabelle 19-15: Betriebskosten

Neandurchmesser	Investitionskosten $K_{i,e}$ [€]	Gesamtkosten CoC_e [€]	Gesamtpreis Rohr K_i [€]	Betriebskosten K_{ok} [€]	Gesamtkosten CoC [€]
DN 15	13.213,44	66.186.720,88	11.200,00	77.776.717,26	77.789.930,70
DN 20	17.342,64	16.510.916,48	9.000,00	17.866.865,53	17.884.208,17
DN 25	21.637,01	5.348.013,35	13.600,00	5.215.317,15	5.236.954,16
DN 32	26.757,22	1.826.285,55	15.500,00	1.683.057,32	1.709.814,53
DN 40	35.428,54	464.281,92	18.300,00	398.789,05	434.217,59
DN 50	42.283,01	216.012,2	24.000,00	158.594,99	200.878,00
DN 65	55.496,45	98.798,01	31.200,00	40.248,78	95.745,22
DN 80	68.131,80	83.315,23	38.400,00	14.263,62	82.395,42
DN 100	88.447,46	92.450,03	55.800,00	3.807,66	92.255,13
DN 125	108.763,13	110.154,90	76.000,00	1.343,35	110.106,48
DN 150	131.556,31	132.082,83	112.700,00	523,03	132.079,34
DN 200	170.535,96	170.675,79	204.800,00	153,18	170.689,14
DN 250	210.093,70	210.141,86	250.500,00	54,38	210.148,08
Minimum	13.213,44	83.315,23	9.000,00	54,38	82.395,42
Maximum	210.093,70	66.186.720,88	250.500,00	77.776.717,26	77.789.930,70
Mittelwert	76.129,74	7.034.603,78	66.230,77	7.935.364,25	8.011.494,00

Tabelle 19-16: Faktoren und CF-Aufwendungen

Neandurchmesser	PhO-Faktor	BwO-Faktor	CF Rohrleitung CF_{Herst} [kg CO ₂ -äq]	Betriebs- emissionen CF_{Betr} [kg CO ₂ -äq]	Gesamt- emissionen CF_{Ges} [kg CO ₂ -äq]	CFO-Faktor
DN 15	1430228,59	944,10	2002,44	166442174,90	166444177,40	5490,48
DN 20	328552,07	217,05	2548,15	38235092,24	38237640,39	1261,34
DN 25	95903,97	63,56	4216,85	11160778,70	11164995,55	368,30
DN 32	30949,58	20,75	5118,85	3601742,66	3606861,51	118,98
DN 40	7333,29	5,27	6607,15	853408,57	860015,72	28,37
DN 50	2916,39	2,44	8726,85	339393,28	348120,13	11,48
DN 65	740,13	1,16	11297,55	86132,38	97429,93	3,21
DN 80	262,29	1,00	15243,80	30524,16	45767,96	1,51
DN 100	70,02	1,12	22166,65	8148,40	30315,05	1,00
DN 125	24,70	1,34	30217,00	2874,77	33091,77	1,09
DN 150	9,62	1,60	41041,00	1119,29	42160,29	1,39
DN 200	2,82	2,07	74640,50	327,80	74968,30	2,47
DN 250	1,00	2,55	91327,50	116,37	91443,87	3,02
Minimum	1,00	1,00	2002,44	116,37	30315,05	1,00
Maximum	1430228,59	944,10	91327,50	166442174,90	166444177,40	5490,48
Mittelwert	145922,65	97,23	24242,63769	16981679,50	17005922,14	560,97

IV ANALYSE WARTUNGSZEITPUNKT

A. BEISPIEL WARTUNGSZEITPUNKT

Die Wartungszeitpunktanalyse nach dem PhO, BwO und dem CFO wurde in Kapitel 14 theoretisch beschrieben und wird im aktuellen Abschnitt anhand eines Beispiels durch-exerziert. Als Beispiel dient hier eine Rohrleitung mit einer Länge von einhundert Metern, durch die ein flüssiges, auf Wasser basierendes Medium gefördert wird. Das Medium ist mit Verunreinigungen versehen, die eine kontinuierliche Verkrustung der Rohrleitungen begünstigen. Das betrachtete Medium entspricht einem newtonschen Fluid, sodass die Ähnlichkeitsgesetze angewendet werden dürfen.⁵²

Im VDI-Wärmeatlas werden die Gleichungen für eine Berechnung der Druckverluste explizit beschrieben. Zusätzlich wird auf die Unsicherheit durch den Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und Rauigkeitscharakter bei der Berechnung hingewiesen. Trotzdem werden die durchgeführten Analysen auf den Gleichungen des VDI gegründet, da die Ergebnisse eine gute Näherung an die realen Bedingungen darstellen.

Die Grundgleichung für den Druckverlust lautet wie folgt:

$$\Delta p = \zeta \cdot a \cdot \frac{\rho \cdot u_i^2}{2} \quad (19-4)$$

Wobei a ein Faktor für die Art des Strömungsproblems ist. Dieser wird für Rohre und Leitungen bestimmt durch Division der Leitungslänge mit dem hydraulischen Querschnitt der Leitung (Gleichung (19-5)):

$$a = f \frac{l}{d_i} \quad (19-5)$$

Grundsätzlich wird unter zwei verschiedenen Rauigkeitsformen unterschieden. Die langgestreckte, wellige Rauigkeit und die kurze höckerige Rauigkeit.⁵³ Bei laminarer Strömung ist eine ausgeprägte Grenzschicht vorhanden, in der Rauigkeiten häufig unbeachtet bleiben können. Steigt jedoch die Reynolds-Zahl an, gewinnt die Oberflächenrauigkeit an Bedeutung. Im turbulenten Bereich ist die Oberflächenbeschaffenheit von signifikantem Einfluss auf den Druckverlust. Ist keine potenzielle Energie nutzbar, muss mechanische Energie für den Fluidtransport aufgewendet werden.

Die „relative Rauigkeit“ ε wird durch die Gleichung (19-6) beschrieben. Der Koeffizient K beschreibt in der Gleichung die mittlere Höhe aller Erhebungen im Rohr.

$$\varepsilon = \frac{K}{d_i} \quad (19-6)$$

Der Widerstandsbeiwert ζ hängt von der Reynolds-Zahl und der relativen Rauigkeit ab.

⁵² Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (2006), S. 1

⁵³ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure (2006), S. 4

Die Reynolds-Zahl wird berechnet nach der Gleichung (19-7):

$$Re_i = \frac{u_i \cdot \rho \cdot d_i}{\eta} \quad (19-7)$$

Für die medium-spezifischen Kennwerte können die Mittelwerte zwischen den Betriebspunkten angesetzt werden.

Tabelle 19-17: Randwerte Wartungsanalyse

Randwerte für die Analyse/Wartungszeitpunkt Rohrleitung			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
Dichte bei (20°C, 1bar)	$\bar{\rho}$	998,21	kg/m³
Dynamische Viskosität (20°C, 1bar)	$\bar{\eta}$	1001,60	*10 ⁻⁶ kg/ms
Geschwindigkeit	u	3	m/s
Absolute Rauigkeit, PhO	K_{PhO}	0,00075	
Absolute Rauigkeit Stahlrohr, gereinigt	$K_{St_{gereinigt}}$	0,2	
Verkrustungsfaktor	VF	0,00001	/h
Leitungslänge	l	100	m
Spezifische Kosten Strom	k_{el}	0,25	€/kWh
Durchmesser Rohr	d	0,1	m
Wartungskosten	K_W	550,00	€
Simulationslaufzeit	n	87600	h
Kosten real t=1	$K_{real t=1}$	0,59	€
Reynolds-Zahl, berechnet	Re	298984,62	
Relative Rauigkeit, berechnet	ε	0,002	
Widerstandsbeiwert gereinigt, abgelesen	$\zeta_{St_{gereinigt}}$	0,024	
Widerstandsbeiwert PhO, abgelesen	ζ_{PhO}	0,0142	
Betriebsemissionen elektrisch	cf_{el}	0,535	kg CO ₂ -äq/kWh
Wartungsemissionen	CF_W	1500	kg CO ₂ -äq

Grundlage der Berechnungen sind die Werte aus Tabelle 19-17.⁵⁴

Die absolute Rauigkeit des eingesetzten Rohres bei Simulationsstart entspricht der absoluten Rauigkeit eines gezogenen Stahlrohres nach einer Reinigung (Quelle VDI-Wärmeatlas, 2006, Lab2). Es wird angenommen, dass eine frühzeitige Reinigung der Leitungen den Qualitätsstandard wiederherstellen kann. Wie die Reinigung erfolgt, ist in den folgenden Berechnungen gänzlich unbeachtet. Ebenfalls basiert der Verkrustungsfaktor auf einer Annahme. Eine anlagen- und medium-spezifische Verschmutzungsvoraussage muss anhand von vorhandenen Kennwerten oder auf Erfahrungswerten der Anlagenbetreiber gestützt

⁵⁴ ebd.

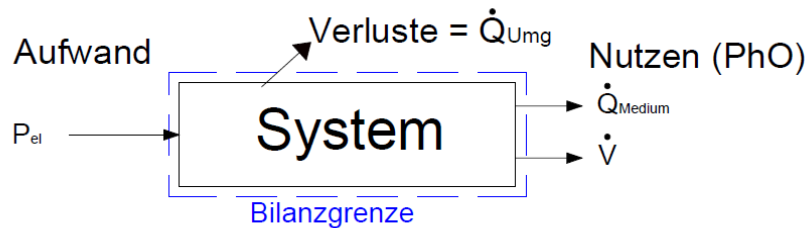
werden. Für die Vorstellung des Rechenverfahrens ist eine oberflächige Betrachtung aber zielführend.

Die Reynolds-Zahl wurde nach Gleichung (19-7) berechnet und in Tabelle 19-17 eingefügt. Ebenso die relative Rauigkeit (Gleichung (19-6)). Der Widerstandsbeiwert entstammt dem Diagramm von *Hausen* (Quelle VDI-Wärmeatlas, 2006, Lab3).

B. ANALYSE DES OPTIMALEN WARTUNGSZEITPUNKTES NACH DEM BWO

Für die betriebswirtschaftliche Bewertung und die Festlegung des optimalen Wartungszeitpunktes müssen die Betriebsstoffkosten bilanziert werden, die in einer Abhängigkeit mit der Ineffizienzsteigerung der Anlage stehen. Also die Kosten die durch die Verschlechterung der Anlage entstehen. In dem Beispiel ist der elektrische Energiebedarf der Pumpe zu berechnen. Durch die Verkrustung des Rohres steigt der Widerstand, was zu erhöhten Betriebskosten führt. Die Wartungskosten inklusive der Produktionsausfallkosten sind bereits in den Gesamtwartungskosten (Tabelle 19-17) enthalten.

Die Randparameter für die elektrische Leistungsdefinition sind identisch mit den Annahmen aus Kapitel III Abschnitt g und gründen auf den Gleichungen (19-1) bis (19-3). Die physikalische Abbildung des Modells stammt aus Abbildung 19-8.



Der Verbrauch zum Zeitpunkt $t = 0$, also ohne eine Verkrustung der Anlage, berechnet sich wie folgt:

$$\dot{V}_{real_{t_0}}^B = \Delta p \cdot \dot{V} \quad (19-8)$$

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

$$\Delta p = 0,024 \cdot \frac{100 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} \cdot \frac{998,21 \text{ kg/m}^3 \cdot (3 \text{ m/s})^2}{2}$$

$$\Delta p = 107806,68 \text{ Pa}$$

Kombiniert ergibt sich folgende Gleichung:

$$\dot{V}_{real_{t_0}}^B = \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V}$$

$$\dot{V} = A \cdot u = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot u \quad (19-9)$$

$$\dot{V}_{real_{t_0}}^B = \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot u$$

$$\dot{V}_{real_{t_0}} = 2,5401 \text{ kW}$$

Für den Verbrauch der Referenzanlage nach dem Betriebswirtschaftlichen Optimum, basierend auf der bestehenden Anlagenkonfiguration, ergibt sich folgende Gleichung:

$$V_{BwO}^B = \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot n \quad (19-10)$$

$$V_{BwO}^B = 222,516 \text{ MWh}$$

Die Kosten entstehen aus dem Produkt des Verbrauchs und den spezifischen Kosten für die Energie:

$$K_{BSK_{BwO}} = V_{BSK_{BwO}} \cdot k_{el}$$

$$K_{BSK_{BwO}} = 55.628,96 \text{ €}$$

Der reale Leistungsbedarf der Anlage, in der die zeitabhängige Verkrustung über den VF-Faktor einfließt, wird für den Zeitpunkt t_x wie folgt berechnet:

$$\dot{V}_{real_{t_x}}^B = \{\zeta + VF \cdot t_x\} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V}$$

Kumuliert über die Betriebslaufzeit ergibt sich der Gesamtverbrauch ohne eine Reinigung bzw. Wartung. Das Produkt des Gesamtverbrauches inklusive den spezifischen Energiekosten führt zu den tatsächlichen Betriebskosten, die entstehen würden ohne eine zwischenzeitliche Reinigung der Anlage.

$$V_{real}^B = \sum_{t=0}^n \left[\{\zeta + VF \cdot t\} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \right]$$

$$K_{BSK_{real}} = V_{real}^B \cdot k_{el}$$

$$K_{BSK_{real}} = 1.070.869,02 \text{ €}$$

Die Zeitpunktdefinition für die Wartungen erfolgt nach Gleichung (14-3).

$$K_{WK_{ges}} = \int_{t_{W0}}^{t_W} [K_{BSK_{real}} - K_{BSK_{BwO}}] (dt)$$

Eingesetzt ergibt sich:

$$K_{WK_{ges}} = \int_{t_{W0}}^{t_W} \left[\{\zeta + VF \cdot t\} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot k_{el} - \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot k_{el} \right] (dt)$$

Die Gleichung lässt sich zusammenfassen und vereinfachen zu:

$$K_{WK_{ges}} = \int_{t_{W0}}^{t_W} \left[[\zeta + VF \cdot t] - \zeta \right] \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot k_{el} (dt)$$

$$K_{WK_{ges}} = \int_{t_{W0}}^{t_W} \left[VF \cdot t \right] \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot k_{el} (dt)$$

$$K_{WK_{ges}} = VF \cdot t_W^2 \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{4} \cdot \dot{V} \cdot k_{el} - VF \cdot t_{W0}^2 \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{4} \cdot \dot{V} \cdot k_{el}$$

Umgestellt nach der Betriebszeit zwischen den Wartungen ergibt sich die Gleichung:

$$\Delta t_{BwO_W} = \sqrt{\frac{4 \cdot K_{WK_{ges}} \cdot d_i}{VF \cdot l \cdot \rho \cdot u^2 \cdot k_{el} \cdot \dot{V}}}$$

$$\Delta t_{BwO_W} = 2039 \text{ h}$$

Ökonomisch optimal wäre eine Wartung der Rohrleitungen alle 2039 Stunden, um die Kosten auf ein Minimum zu begrenzen. In Abbildung 19-11 sind die Kostenverläufe grafisch dargestellt.

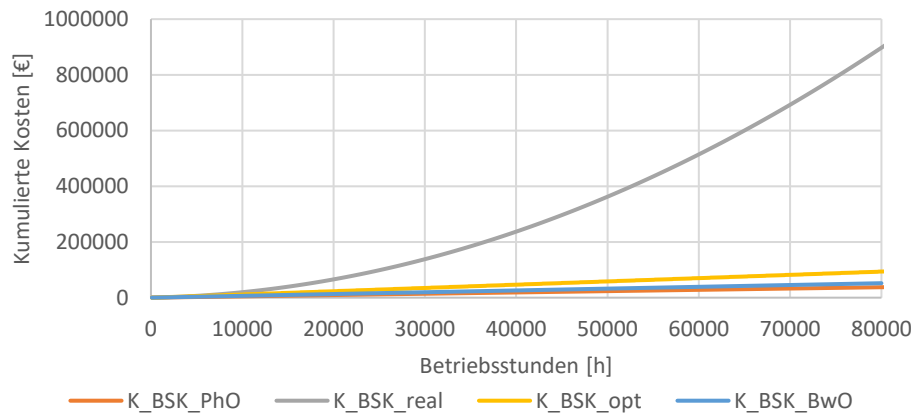


Abbildung 19-11: Kumulierter Kostenverlauf

Die resultierenden Anlagenkosten nach dem Betriebswirtschaftlichen Optimum berechnen sich anhand der Kosten innerhalb einer Wartungsperiode. In Kapitel 14 wurde bereits auf die erhöhten Kosten innerhalb der beiden ersten Wartungsperioden eingegangen. Dies soll grafisch durch Abbildung 19-12 noch einmal verdeutlicht werden.

$$K_{WP} = \sum_{t=0}^{t=t_W} \left[\left\{ \zeta + VF \cdot t \right\} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \right] \cdot k_{el} + K_{WK_{ges}}$$

$$K_{WP} = 1845,14 \text{ €} + 550 \text{ €} = 2394,14 \text{ €}$$

$$K_{BSK_{opt}} = K_{WP} \cdot \frac{t}{t_W}$$

$$K_{BSK_{opt}} = 102.900,00 \text{ €}$$

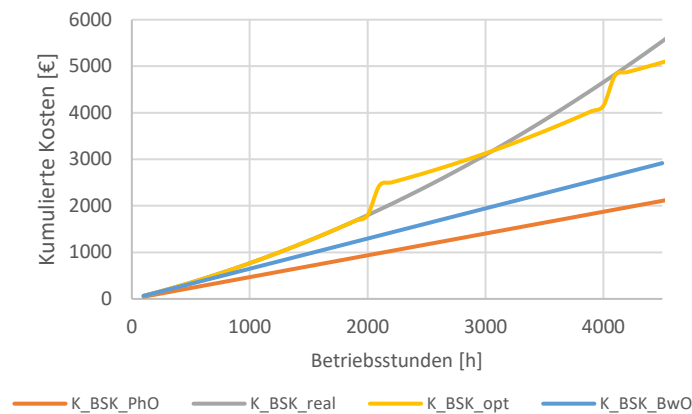


Abbildung 19-12: Kostenverlauf über 4500 h

Durch die erhöhten Wartungskosten kommt es vor der zweiten Wartung zu einem finanziellen Mehraufwand (Abbildung 19-12).

C. ANALYSE DES OPTIMALEN WARTUNGSZEITPUNKTES NACH DEM CFO

Die Berechnungen nach dem CFO laufen weitestgehend analog zu den Berechnungen des BwO ab und werden im folgenden Ablauf verkürzt hergeleitet.

Die Wartungsemissionen basieren auf Annahmen und dienen lediglich zur Verfahrensbeschreibung (Tabelle 19-17). Eine Herleitung der Wartungsemissionen kann beispielsweise über die Emissionsaufwendungen der Wartungsmaterialien, An- und Abfahrten und der Energieeinsatz während der Wartung bestimmt werden. Die Betriebsemissionen resultieren aus dem Energiebedarf des Systems während der Betriebsphase. Die elektrische Verbrauchsgleichung aus der BwO-Analyse kann aus dem Anhang Abschnitt IV b übernommen werden.

$$V_{real}^B = \sum_{t=0}^n \left[\{ \zeta + VF \cdot t \} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \right]$$

Die Betriebsemissionen entstehen in dem Beispiel lediglich aus dem elektrischen Energiebedarf der Förderpumpe (Tabelle 19-17).

$$CF_{Betr} = V_{rea}^B \cdot cf_{el}$$

Der ökologische Wartungsaufwand soll äquivalent dem Aufwand der ansteigenden, zeitabhängigen Ineffizienz sein und den Zeitpunkt einer optimalen ökologischen Wartung definieren. Grundlage bildet die in dieser Arbeit entwickelte Gleichung (14-5).

$$CF_W = \int_{t_{W0}}^{t_W} [CF_{real} - CF_{BwO}] (dt)$$

$$CF_W = \int_{t_{W0}}^{t_W} \left[\left\{ \zeta + VF \cdot t \right\} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot cf_{el} - \zeta \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot cf_{el} \right] (dt)$$

Der Zeitpunkt t_{W0} wird auf den Startwert gelegt, daraus resultiert die Gleichung:

$$CF_W = \int_{t_{W0}}^{t_W} \left[\left\{ \zeta + VF \cdot t \right\} - \zeta \right] \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot cf_{el} (dt)$$

$$CF_W = \frac{1}{2} VF \cdot t_W^2 \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V} \cdot cf_{el}$$

Durch den Bezug auf den Nullpunkt kann der Zeitpunkt der Analyse als die Differenzzeit zwischen den Wartungen deklariert werden:

$$\Delta t_{CFOW} = t_W$$

Anschließend folgt eine Umstellung nach der Differenzzeit Δt_{CFOW} und eine Auflösung des Integrals:

$$\Delta t_{CFOW} = \sqrt{\frac{4 \cdot CF_W \cdot d_i}{VF \cdot l \cdot \rho \cdot u^2 \cdot cf_{el} \cdot \dot{V}}}$$

$$\Delta t_{CFOW} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1500 \text{ kg CO}_2 \cdot 0,1 \text{ m}}{0,00001 \cdot 100 \text{ m} \cdot \frac{998,21 \text{ kg CO}_2}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{3 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot \frac{0,535 \text{ kg CO}_2}{\frac{\text{kWh}}{1000 \text{ Wh}}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,1 \text{ m})^2 \cdot 3 \text{ m/s}}}$$

$$\Delta t_{CFOW} = 2301,76 \text{ h}$$

Das optimale Wartungsintervall liegt bei der ökologischen Untersuchung, bezogen auf die Treibhausgase, bei ca. 2302 Stunden.

D. ANALYSE DES OPTIMALEN WARTUNGSZEITPUNKTES NACH DEM PHO

In Abschnitt 14.3 wurde bereits die Deutung des optimalen Wartungszeitpunktes nach dem PhO erläutert. Der PhO-Faktor priorisiert eine Wartung, sobald eine Abweichung von dem Anlagenoptimum anfällt. Der PhO-Faktor kann helfen, den optimalen betriebswirtschaftlichen oder ressourcenschonendsten Zeitpunkt für die Wartung zu bestimmen. Dies kann aber nur in Verbindung mit Messtechnik und Monitoring erfolgen.

In dem folgenden Beispiel sollen die Grenzwerte des PhO-Faktors, über das BwO aus der Wartungsanalyse definiert werden.

$$f_{PhOW} = \frac{\dot{V}_{t_W}^B}{\dot{V}_{PhO}^B}$$

$$f_{PhoW} = \frac{\{\zeta + VF \cdot t_W\} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V}}{\zeta_{Pho} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \dot{V}}$$

$$f_{PhoW} = \frac{\zeta + VF \cdot t_W}{\zeta_{Pho}}$$

$$f_{PhoW} = \frac{0,024 + \frac{0,00001}{h} \cdot 2039 \text{ h}}{0,00075}$$

$$f_{PhoW} = 59,19$$

Der PhO-Faktor, an dem eine Wartung nach dem BwO erfolgen sollte, liegt bei 59,19. Der relativ hohe Wert resultiert aus der Differenz zu den „glatten Rohren“ die nach dem PhO-Faktor, die höchste physikalische Effizienz durch den geringsten Widerstand darstellen. Rohre aus poliertem Glas könnten in die Nähe dieser theoretischen Werte gelangen. Der reguläre PhO-Faktor des Stahlrohres nach der Wartung, fällt auf einen Wert von 32 ab. Sollte eine Vorbereitungszeit für die Wartung benötigt werden, muss der PhO-Faktor für die Meldung der Wartung verringert werden. Als Beispiel sei eine Vorbereitungszeit von drei Tagen angesetzt. Daraus ergibt sich ein PhO-Faktor von 58,2 für die Signalschwelle der Wartungsmeldung.

V ANALYSE ERSATZPROBLEM

Die Investitionsrechnung zum Ersatzproblem aus Kapitel 15 basiert auf der Kapitalwertmethode. In einer Analyse zum geeigneten Verfahren für die Ersatzwertproblematik wurden die statischen Investitionsrechnungen (Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung) mit den entwickelten Faktoren für die Teuerung und die Verzinsung (Barwert) erweitert und anschließend in die Kapitalwertmethode überführt. Dies wird im aktuellen Kapitel dargestellt.

A. KOSTENVERGLEICHSRECHNUNG ERSATZPROBLEM

Eine Möglichkeit der Analyse kommt aus der statischen Investitionsrechnung mit der Kostenvergleichsrechnung. Es werden die Kosten der Bestandsanlage und der Neuanlage gegenübergestellt und miteinander verglichen (Abschnitt 3.3.1).

Gleichung (3-10) wurde um das Index B für die Bestandsanlage erweitert. Die Gleichung für die Neuanlage verhält sich analog und wird mit dem Index N versehen. Es handelt sich um eine einperiodische Betrachtung für ein Betriebsjahr.

$$K_{KVR,B} = K_{fB} + k_{VB} \cdot x + \frac{A_{0B} - L_{nB}}{n} + \left[\frac{A_{0B} + L_{nB}}{2} \right] \cdot i$$

Soll die Gleichung auf die komplette Betriebslaufzeit erweitert werden, dann muss der Zeitfaktor hinzugefügt werden:

$$K_{KVR,Bn} = \left\{ K_{fB} + k_{VB} \cdot x + \frac{A_{0B} - L_{nB}}{n} + \left[\frac{A_{0B} + L_{nB}}{2} \right] \cdot i \right\} \cdot n$$

$$K_{KVR,Bn} = \left\{ K_{fB} + k_{VB} \cdot x + \left[\frac{A_{0B} + L_{nB}}{2} \right] \cdot i \right\} \cdot n + A_{0B} - L_{nB}$$

Ebenfalls können die Gleichungen mit den dynamischen Ersatzfaktoren aus Abschnitt 8.4 erweitert werden. Das Hinzufügen der Faktoren für die Teuerung und den Barwert sorgt für die Wandlung von einer statischen zu einer dynamischen Investitionsbewertung.

$$K_{KVR,Bn} = \left[\left\{ K_{fB} \cdot TZ_f + k_{VB} \cdot x \cdot TZ_V + \left[\frac{A_{0B} + L_{nB}}{2} \right] \cdot i \right\} \cdot n + A_{0B} - L_{nB} \right] \cdot Z$$

Anschließend erfolgt eine Auflösung nach dem Zeitpunkt für die Gleichwertigkeit der Anlagen. Ist dieser Zeitpunkt geringer als die Betriebslaufzeit, dann ist eine Investition aus betriebswirtschaftlicher Sicht empfehlenswert. Zu beobachten ist die Rückverwandlung der dynamischen Kostenrechnung hin zur statischen Kostenrechnung. Der Zinsfaktor ist auf beiden Seiten der Gleichung identisch und führt zu einer Neutralisierung des Einflusses.

$$K_{KVR,Bn} = K_{KVR,Nn} \quad (19-11)$$

$$n_{min} = \frac{A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}}{\left[(K_{fB} - K_{fN}) \cdot TZ_f + (K_{VB} - K_{VN}) \cdot TZ_V \cdot x + (A_{0B} - A_{0N} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot \frac{i}{2} \right]} \quad (19-12)$$

Die Gleichung ist nur gültig, wenn die Betriebslaufzeit und somit die Faktoren für die Teuerung und die Verzinsung eindeutig feststehen. Wird die Gleichung anders angesetzt, z. B. um eine Mindestbetriebszeit für eine Rentabilität zu untersuchen, dann müssen die Faktoren iterativ an das jeweilige Ergebnis angepasst werden.

Werden die variablen Kosten nicht nach einer Produktionsstückzahl deklariert, sondern über den kumulierten Jahresenergiebedarf (z. B. Strombedarf), dann verändert sich Gleichung (19-12) zu Gleichung (19-13).

$$n_{min} = \frac{A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}}{\left[(K_{OKB} - K_{OKN}) \cdot TZ + (A_{0B} - A_{0N} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot \frac{i}{2} \right]} \quad (19-13)$$

In der Verbindung mit dem Physikalischen Optimum stellt sich die Frage, welche physikalische Effizienzverbesserung welche Investition rechtfertigt. Für die Berechnung gelten folgende Randbedingungen:

Randbedingung 1:

$$K_{KVR,B_t} = K_{KVR,N_t}$$

Die erste Randbedingung beschreibt die Gleichwertigkeit der beiden Systeme (die Systeme sind betriebswirtschaftlich indifferent).

Randbedingung 2:

$$\Delta F_{PhO\ B-N} = \frac{V_B^B}{V_{PhO}^B} - \frac{V_N^B}{V_{PhO}^B} = \frac{V_B^B - V_N^B}{V_{PhO}^B} \quad (19-14)$$

Kombiniert mit den Kostenvergleichsrechnungen der Bestands- und der Neuanlage ergibt sich folgende Gleichung:

$$\Delta F_{PhO\ B-N_{min}} = \frac{A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}}{n \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} - \frac{(K_{fB} - K_{fN})}{V_{PhO}^B \cdot k_{el}} - \frac{(A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot i}{2 \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} \quad (19-15)$$

In der abgebildeten Gleichung (19-16) sind die variablen Kosten Bestandteile der Energiekosten:

$$K_V = V^B \cdot k_{el} \quad (19-16)$$

Ist der tatsächliche Leistungsdifferenzfaktor zwischen den zu vergleichenden Anlagen größer als das Ergebnis der Berechnung aus Gleichung (19-15), stellt sich ein betriebswirtschaftlicher Vorteil für eine Neuinvestition ein. Kommen nun mehrere unterschiedliche Verfahren für die Neuinvestition in Frage, dann können die unterschiedlichen Anlagen nach der Technologieanalyse bezüglich ihres PhO-, BwO- und dem CFO-Werts verglichen und der Kompromisspunkt analysiert werden.

Führt man mit dem Wert der Betriebslaufzeit eine Sensitivitätsanalyse durch, ergeben sich die Abhängigkeiten der Ergebnisse zueinander. In Abbildung 19-13 wurde die Betriebslaufzeit zwischen einem Jahr und 15 Jahren variiert. Die linke Ordinate beschreibt die beiden PhO-Graphen. Der benötigte PhO-Faktor der Neuanlage resultiert aus jenem der Bestandsanlage und dem notwendigen PhO-Differenzfaktor. Hier sei darauf hingewiesen, dass die physikalischen Grenzen nicht unterschritten werden können. Physikalisch sind alle Anlagen unrealisierbar, die unter dem PhO-Faktor 1 liegen. Die erste physikalisch realisierbare Anlage, ist ökonomisch sinnvoll nach 3,5 Jahren bei konstanten Investitionskosten. Steigen die Investitionskosten jedoch an, dann erhöht sich die benötigte Effizienzdiffferenz.

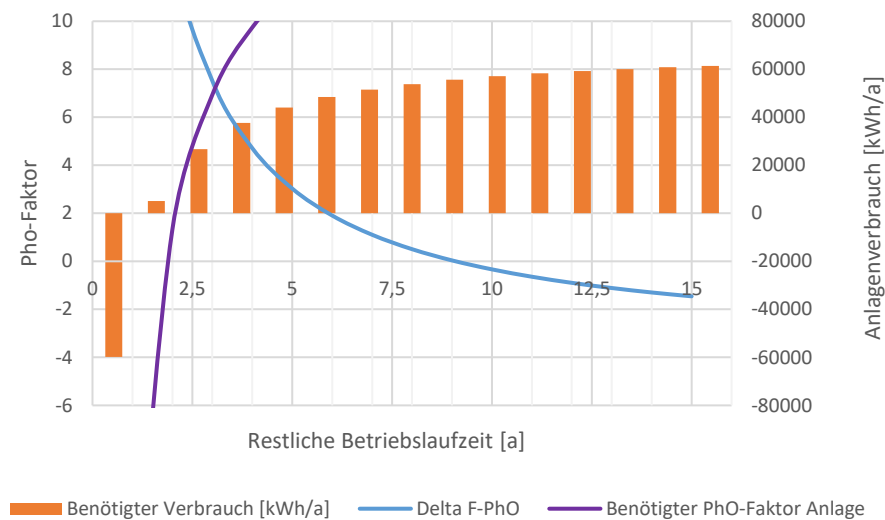


Abbildung 19-13: Notwendige Anlageneffizienz und Restlaufzeit

B. GEWINNVERGLEICHSRECHNUNG ERSATZPROBLEM

Die Gewinnvergleichsrechnung basiert auf der Kostenvergleichsrechnung und wird in Abschnitt 3.3.2 beschrieben. Diese ist anzuwenden, wenn die Erträge der beiden Vergleichsanlagen nicht identisch sind. Somit kann eine Anlage nach der Kostenvergleichsrechnung sinnvoll sein, aber nach der Gewinnvergleichsrechnung nicht priorisiert werden.

1. Randbedingung:

$$G = E - A$$

Der Gewinn besteht aus der Differenz zwischen dem Ertrag und dem Aufwand. Der Aufwand basiert auf dem Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung.

2. Randbedingung:

$$K_{KVR} = A$$

Die Systeme sind indifferent zueinander, wenn beide Gewinne äquivalent sind:

3. Randbedingung:

$$G_B = G_N$$

4. Randbedingung:

$$n = t$$

Die Anlagen werden wieder bis zum Ende der Betriebslaufzeit abgeschrieben. Dafür werden die kalkulatorischen Abschreibungen auf die Betriebslaufzeit bezogen.

$$n_{min} = \frac{A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}}{\left[e_N - e_B + (K_{OKB} - K_{OKN}) \cdot TZ + (A_{0B} - A_{0N} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot \frac{i}{2} \right]} \quad (19-17)$$

Die Gleichung (19-17) wurde bewusst ohne eine Reduktion auf den Barwert aufgestellt. Dieser würde sich wie bei der Kapitalwertmethode raus kürzen. Am Zeitpunkt t sind die beiden Anlagen indifferent. Die Restbetriebslaufzeit der Anlage sollte höher als die Zeit der Gleichwertigkeit liegen, damit ein betriebswirtschaftlicher Vorteil generiert werden kann. Analog zur Betrachtung aus dem vorherigen Abschnitt wird die minimale Effizienzdifferenz für eine Rentabilität der Anlage bestimmt.

$$\begin{aligned} \Delta F_{PhO\ B-N_{min}} = & \frac{A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}}{n \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{K_{fN} - K_{fB}}{V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{E_B - E_N}{TZ \cdot k_{el} \cdot V_{PhO}^B} \\ & + \frac{(A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot i}{2 \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} \end{aligned} \quad (19-18)$$

Die Gleichung gilt für eine Betriebslaufzeit identisch der Abschreibungsdauer $n = t$. Sollte eine abweichende Anlagenbetriebszeit eingeplant werden, dann muss die Gleichung iterativ über die laufzeitabhängigen Faktoren durchgeführt werden.

C. ERGEBNIS ERSATZPROBLEM

Die Mindestbetriebslaufzeit oder der Minstdifferenzfaktor für eine Vorteilhaftigkeit der Neuanlage gegenüber der Bestandsanlage wird über den Punkt der Indifferenz hergeleitet. Bei einer Gegenüberstellung der Gleichungen (19-18) (hergeleitet über die Gewinnvergleichsrechnung) und Gleichung (15-3) (hergeleitet über die Kapitalwertmethode) ist zu erkennen, dass lediglich der Zinsfaktor im Nenner der Differenzinvestitionskosten vorhanden ist. Dieser Effekt resultiert aus einer unterschiedlichen Zeitpunkt Betrachtung der Investitionskosten. Während bei der GVR die Investitionskosten linear verteilt über die Betriebslaufzeit festgelegt werden, fällt in der Kapitalwertmethode der Investitionseinsatz direkt am Zeitpunkt $t = 0$ an.

D. BEISPIEL BELEUCHTUNGSANLAGE ERSATZPROBLEM

Mit Zuhilfenahme der entwickelten Gleichungen aus Kapitel 15 soll ein reales System bilanziert werden. Das Unternehmen ABZ Aggregate-Bau GmbH stellt ihre Produktionshallen für eine Ersatzwertproblemanalyse zur Verfügung. Natürlich kann die Analyse auch auf andere Objekte oder Projekte übertragen werden.

Im Fokus der Betrachtung stehen die Hallenbeleuchtungsanlagen der Produktions- und der Prüfhallen. Die Produktionshallen wurden 1990/2000 errichtet und werden erhellt durch Leuchtstoffröhren mit Startern. Die Prüfhallen sowie kleinere Nebenhallen weisen eine identische Beleuchtungstechnologie auf. Die Gesamtgrundfläche aller Hallen summiert sich auf 2112 m². Die vorhandenen Beleuchtungseinrichtungen werden jährlich gereinigt und gewartet. Instandsetzungsmaßnahmen werden, soweit es möglich ist, mit den jährlichen Wartungen kombiniert.

Die Vergleichsanlage wurde von einem führenden Beleuchtungsanlagenhersteller berechnet und angeboten. Die Ersatzanlage basiert auf der LED-Technologie (Light-Emitting-Diode) und soll so ökonomische und ökologische Vorteile aufweisen. Auf den gegebenen Analysedaten des Beleuchtungsanlagenherstellers wird die Berechnung über das PhO, BwO und das CFO aufgesetzt und die Ergebnisse des Beleuchtungsanlagenherstellers gegengeprüft. Die eingesetzten Randparameter werden geprüft und angeglichen. Somit kann eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden.

Getroffene Randparameter:

Die Bestandsanlage ist mit Leuchtstoffröhren des Typs TL-D 58 W KVG und zusätzlichen Startern ausgestattet. Die Lampen haben eine durchschnittliche Lebenserwartung von 8000 h und müssen anschließend erneuert werden. Der Betrachtungszeitraum beläuft sich über 16 Jahre mit einer jährlichen Einschaltdauer von ca. 3120 h. Die Werte stammen aus den Wartungsbüchern der Fabrikleitung und dienen als Grundlage der Kalkulationen. Die spezifischen Energiekosten liegen bei 0,21 €/kWh, eine Kostensteigerung der Energie- oder der Reinvestitionskosten für die Anlagentechnik wird nicht berücksichtigt. Daher werden die entwickelten Faktoren auf eins gesetzt. Die notwendige Beleuchtungsstärke stammt aus der DIN V 18599 und wird mit 400 lm/m² als Wartungswert für gewerbliche und industrielle Hallen mit mittelschwerer Arbeit festgelegt.⁵⁵

Alle Angaben sind in Tabelle 19-18 zusammengefasst.

⁵⁵ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *DIN V 18599-4* (2016), S. 13

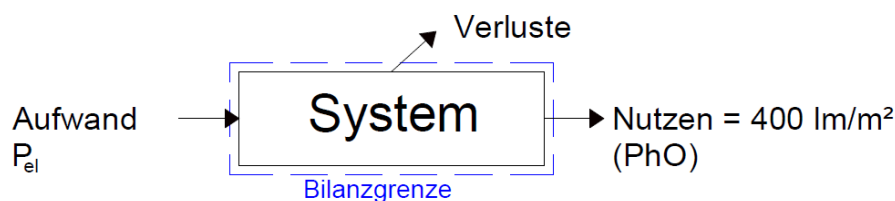


Abbildung 19-14: Bilanzsystem einer Beleuchtungsanlage

Die Verluste der Beleuchtungsanlage werden in Streuverluste und Wärmeenergie umgewandelt. Der Begriff Verluste beinhaltet alle Arten der Ineffizienz in den Berechnungen.

Tabelle 19-18: Randwerte Ersatzproblem

Randwerte für die Analyse zum Ersatzproblem			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	n_{LCC}	16	A
Investitionskosten Bestandsanlage $t = 0$	A_{0B}	0,00	€
Investitionskosten Neuanlage $t = 0$	A_{0N}	27280,00	€
Restwert der Bestandsanlage $t = 16$	L_{nB}	0,00	€
Restwert der Neuanlage $t = 16$	L_{nN}	0,00	€
Ertrag Bestandsanlage	e_B	0,00	€/a
Ertrag Neuanlage	e_N	0,00	€/a
Wartungskosten Bestandsanlage	WK_B	1903,25	€/a
Wartungskosten Neuanlage	WK_N	95,00	€/a
Energiebedarf Bestandsanlage	P_B	17880	W
Energiebedarf Neuanlage	P_N	6759	W
Betriebslaufzeit im Jahr	t_a	3120	h/a
Spezifische Energiekosten	k_{el}	0,21	€/kWh
Teuerungsfaktor Betriebskosten	TZ	1	
Verzinsungsfaktor Barwert	Z	1	
Kalkulatorischer Zinssatz	i	0	%

Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass die Analyse zum Ersatzproblem lediglich eine Entscheidungshilfe für die Erneuerung einer bestehenden Anlage darstellt. Grundlage der Entscheidung können die ökologischen und/oder die ökonomischen Vorteile sein.

E. ÖKONOMISCHE BEWERTUNG ZUM ERSATZPROBLEM

Für die ökonomische Bewertung stehen die beiden entwickelten Verfahren aus Kapitel 15 zur Verfügung. In dem ersten Verfahren wird die minimale Einsatzzeit einer neuen Anlage berechnet. Ist die berechnete Einsatzzeit geringer als die geplante Restbetriebszeit t , dann ist eine Reinvestition vorteilhaft. Im zweiten Verfahren wird der theoretisch erforderliche

Effizienzunterschied zwischen der Bestands- und der Neuanlage analysiert. Ist der tatsächliche Effizienzunterschied besser als das Ergebnis aus der Berechnung, dann ist ein ökonomischer Vorteil vorhanden.

$$K_{OK} = WK + P \cdot k_{el} \cdot n$$

$$K_{OKB} = 13.618,23 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$K_{OKN} = 4.523,50 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$n_{BWO_{min}} = \frac{\frac{A_{0N} - A_{0B}}{Z} + L_{nB} - L_{nN}}{\left[(K_{OKB} - K_{OKN}) \cdot TZ + (A_{0B} - A_{0N} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot \frac{i}{Z} \right]}$$

$$n_{BWO_{min}} = \frac{\frac{27270 \text{ €} - 0 \text{ €}}{1} + 0 \text{ €} - 0 \text{ €}}{\left[\left(13618,23 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 4523,50 \frac{\text{€}}{\text{a}} \right) \cdot 1 + (0 - 27270 + 0 - 0) \cdot \frac{0}{2} \cdot \frac{\text{€}}{\text{a}} \right]}$$

$$n_{BWO_{min}} = \frac{27270 \text{ €}}{13618,23 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 4523,50 \frac{\text{€}}{\text{a}}}$$

$$n_{BWO_{min}} = 3 \text{ a} = 3 \text{ Jahre}$$

Das Ergebnis besagt, dass sich die Neuanlage mit den ausgeschriebenen Investitionskosten innerhalb von drei Jahren amortisiert. Somit ist eine Neuanlage eine ökonomisch sinnvolle Investition, bei einer angenommenen Betriebslaufzeit von 16 Jahren. Das Ergebnis deckt sich mit der Aussage des Beleuchtungsanlagenherstellers.

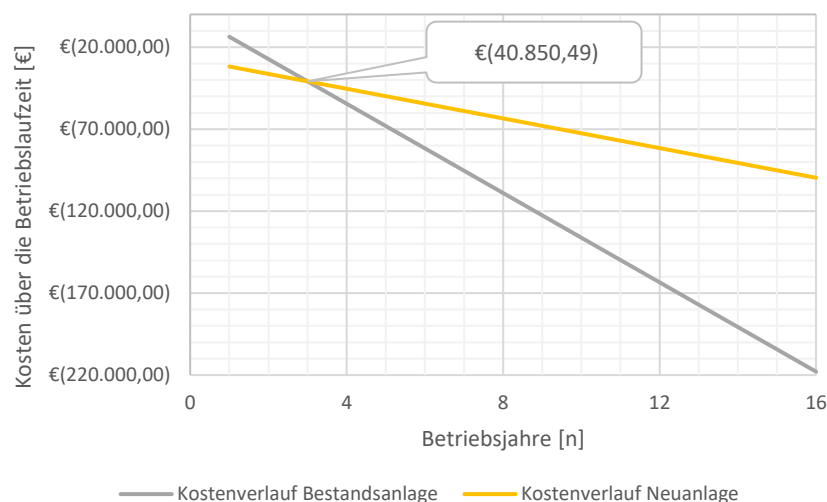


Abbildung 19-15: LCC-Analyse Neu- und Bestandsanlage

Für die Berechnung über die Restbetriebslaufzeit nach Gleichung (15-2) muss ein neues System bekannt sein. Die technischen Daten müssen vorliegen, ansonsten könnten die Investitions- und Betriebskosten der neuen Anlage lediglich geschätzt werden.

Befindet sich ein Unternehmen noch im Entscheidungsprozess, ob es sich überhaupt die Mühe machen soll Vergleichsanalysen durchzuführen, dann kann Gleichung (15-3) eine Vorentscheidung liefern. Eine Budgetierung, technische Randbedingungen und Informationen für die Bestandsanlage können zeitnah zusammengestellt werden und benötigen noch keine externen Angebote.

Dass die Anlagenkennwerte der Bestandsanlage vorliegen, wird in der aktuellen Analyse vorausgesetzt. Anschließend muss noch das Physikalische Optimum bestimmt werden. Im Fall der Beleuchtungsanlage wird das Physikalische Optimum auf die Lichtstärke pro Fläche bezogen.

Die DIN V 18599-4 schreibt die Beleuchtungsstärke in einer Nutzebenhöhe von 0,85 m für stehende Tätigkeiten mit $400 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$ vor [28]. Der Wartungswert ist die mindeste mittlere Beleuchtungsstärke, bevor eine Wartung der Beleuchtungsanlage stattfinden muss.⁵⁶ Daraus folgt, dass die Produktionshallen mit einer Grundfläche von 2112 m² einen Lichtstrom von 844800 lm benötigen. Nicht berücksichtigt in der Analyse ist der Wartungsfaktor WF von 0,67 und der Anpassungsfaktor für den Wartungsfaktor $0,8/WF$, der die Beleuchtungsstärke weiter vergrößern würde.⁵⁷ Flächenvergrößernde vertikale Oberflächen werden wie in der Berechnung vom Beleuchtungsanlagenhersteller nicht einbezogen. Der Lichtstrom setzt sich aus der Lichtstärke und dem Raumwinkel zusammen. Die Lichtstärke I wird in der SI-Einheit Candela ausgedrückt.

„Eine Lichtquelle hat die Lichtstärke von 1 Candela, wenn sie in jeder Sekunde in alle Richtungen einfarbiges Licht mit einer Wellenlänge 555 nm und der Energie $4 \cdot \pi \cdot \frac{1}{683} \text{Ws}$ aussendet.“ [44]

Die Wellenlänge von 555 nm entspricht einer gelbgrünen Spektralfarbe, die vom menschlichen Auge als besonders hell wahrgenommen wird. Ein Lumen setzt sich aus der Multiplikation der Lichtstärke mit dem Raumwinkel zusammen und wird in Steradian bemessen.

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ sr} \cdot \text{cd} \quad (19-19)$$

Der Raumwinkel Ω betrachtet die Teiloberfläche einer Kugel in Abhängigkeit des Radius bzw. bei einer Einheitskugel ist der Raumwinkel gleich der Oberfläche der Kugel. Weitere Berechnungen werden mit der Einheitskugel durchgeführt.

$$\Omega = 4 \cdot \pi \quad (19-20)$$

Wird der Lichtstrom ebenfalls auf die Einheitskugel bezogen, dann ist der gesamte Lichtstrom gleich der Lichtleistung. Daraus folgt, dass für jedes Watt an Leistung ein Lichtstrom von 683 Lumen bei einer Wellenlänge von 555 nm theoretisch möglich ist. Somit ergibt sich ein physikalisch optimaler Energieeinsatz aus dem Bedarf des Lichtstromes für die Hallen,

⁵⁶ ebd.

⁵⁷ ebd.

bei einer reversiblen Lichtproduktion und verlustfreien Umlenkungen der Strahlungen durch Spiegelreflektoren:

$$P_{PhO} = \frac{844800 \text{ lm}}{683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}}$$

$$P_{PhO} = 1,237 \text{ kW}$$

Nachdem die relevanten Parameter berechnet wurden, kann die Analyse über Gleichung (15-5) beginnen.

$$\begin{aligned} \Delta F_{PhOBwOmin} &= \frac{\frac{A_{0N} - A_{0B}}{Z} + L_{nB} - L_{nN}}{n_{LCC} \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{K_{fN} - K_{fB}}{V_{PhO}^B \cdot k_{el}} + \frac{(A_{0N} - A_{0B} + L_{nB} - L_{nN}) \cdot i}{2 \cdot TZ \cdot V_{PhO}^B \cdot k_{el}} \\ \Delta F_{PhOBwOmin} &= \frac{\frac{27270 \text{ €} - 0 \text{ €}}{1} + 0 \text{ €} - 0 \text{ €}}{16 \cdot 1 \cdot 3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} + \frac{(4523,5 \text{ €} - 13618,23 \text{ €})}{3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} \\ &\quad + \frac{(27270 \text{ €} - 0 \text{ €} + 0 \text{ €} - 0 \text{ €}) \cdot 0}{2 \cdot 1 \cdot 3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} \\ \Delta F_{PhOBwOmin} &= \frac{27270 \text{ €}}{16 \cdot 1 \cdot 3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} + \frac{(95 \text{ €} - 1903,25 \text{ €})}{3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} \\ \Delta f_{PhOBwOmin} &= \Delta F_{PhOBwOmin} = -0,128 \end{aligned}$$

Das Ergebnis besagt, dass selbst eine ineffizientere Anlage nach einer Betriebslaufzeit von 16 Jahren einen monetären Vorteil aufweisen würde. Dieses Ergebnis resultiert aus den unterschiedlichen Wartungskosten der Anlagen. Sollten die Wartungskosten in einem ersten Schritt noch nicht bekannt sein, dann würde die Gleichung wie folgt aussehen:

$$\begin{aligned} \Delta F_{PhOBwOmin} &= \frac{27270 \text{ €}}{16 \cdot 1 \cdot 3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} \\ \Delta F_{PhOBwOmin} &= \frac{27270 \text{ €}}{16 \cdot 1 \cdot 3859,44 \text{ kW} \cdot 0,21 \text{ €/kWh}} \\ \Delta F_{PhOBwOmin} &= 2,103 \end{aligned}$$

In Abbildung 19-16 sind die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse über die Anlagenbetriebslaufzeit eingetragen. Deutlich ist zu erkennen, dass eine sehr kurze Anlagenbetriebszeit einen besonders großen Unterschied im PhO-Faktor für eine Rentabilität erfordert. Dies geht sogar so weit, dass die Beleuchtungsanlage Strom produzieren müsste, um rentabel zu sein. Die Ergebnisse basieren auf den Tabellenwerten (Tabelle 19-18).

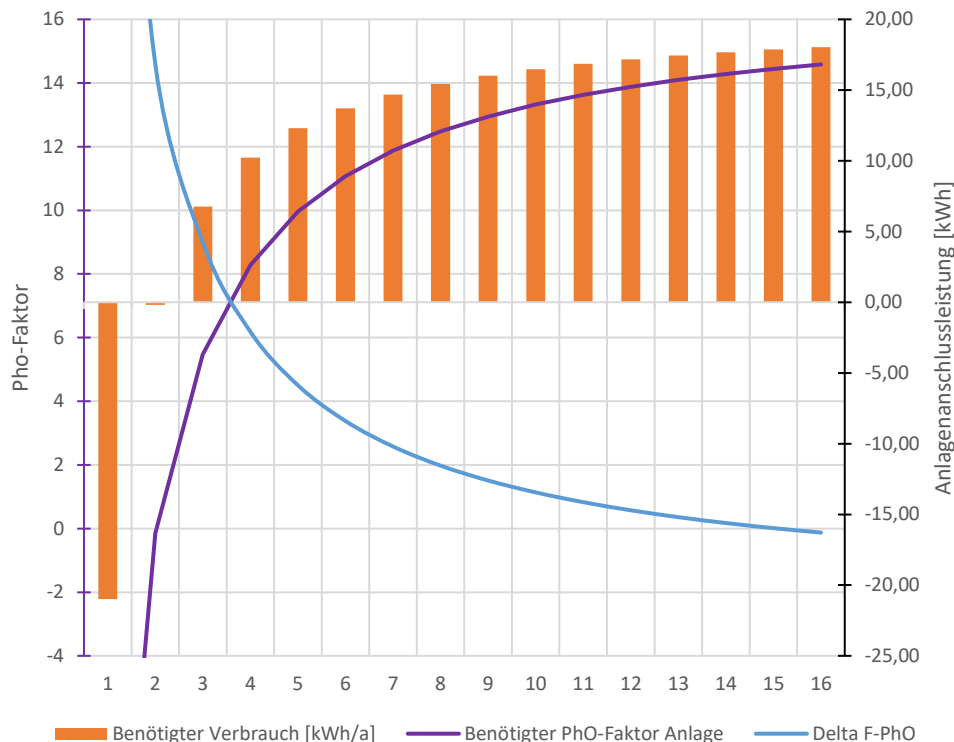


Abbildung 19-16: Notwendige Anlageneffizienz beim Ersatzproblem

F. ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG ZUM ERSATZPROBLEM

Der Ansatz der ökologischen Bewertung ist in Abschnitt 15.2 erläutert. Hier wird das Beispiel der Lichtanlage aufgegriffen und nach dem CFO bewertet.

Der Beleuchtungsanlagenhersteller Phillips verweist auf den großen ökologischen Vorteil der effizienten LED-Technologie und preist eine Nachhaltigkeit ihrer Systeme an. Leider ist Phillips aber nicht gewillt eine Ökobilanz seiner Produkte zu erstellen oder zu veröffentlichen. Phillips lässt sich lediglich zu der Aussage verleiten, dass neunzig Prozent der CO₂-äquivalenten Emissionen aus dem LCC während der Betriebsphase ausgestoßen werden. Somit verbleiben zehn Prozent für die Herstellung, die Distribution und das Recycling. Diese Angabe kann als realistisch angesehen werden. Der Marktbegleiter Osram hat in einer Studie den kumulierten Energieaufwand untersucht und festgestellt:

„Ähnlich wie bei Kompaktleuchtstofflampen werden bei LED-basierten Lampen über 98 Prozent der aufgewendeten Energie im Einsatz, also bei der Erzeugung von Licht, verbraucht. Unter zwei Prozent entfallen auf die Produktion.“ [45]

Der Beleuchtungsanlagenhersteller hat in seinen Berechnungen den spezifischen Emissionsausstoß für eine Kilowattstunde elektrischer Energie aus dem Verbundnetz mit 0,562 kg CO₂-äq. ausgewiesen.⁵⁸ Das entspricht ungefähr dem Wert von 2014 aus Abbildung 9-1.

⁵⁸ Vgl. Argendorf, M. (2017), S. 8

Im ersten Schritt wird die Mindestbetriebszeit der Neuanlage untersucht, damit die zusätzlichen Aufwendungen der Herstellung, Distribution und des Recyclings sich ökologisch vorteilhaft auswirken.

$$n_{CFO_{min}} = \frac{CF_{Herst_N} + CF_{Distr_N} + CF_{Recyc_N}}{cf \cdot (V_B^B - V_N^B)}$$

$$CF_{Herst_N} + CF_{Distr_N} + CF_{Recyc_N} = V_N \cdot n_{LCC} \cdot cf \cdot 10\%$$

$$n_{CFO_{min}} = \frac{P_N \cdot n_a \cdot n_{LCC} \cdot cf \cdot 10\%}{cf \cdot \{(P_B - P_N) \cdot t_a\}}$$

$$n_{CFO_{min}} = \frac{6,759 \text{ kW} \cdot 3120 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 16 \text{ a} \cdot 10 \text{ \%}}{\{(17,88 \text{ kW} - 6,759 \text{ kW}) \cdot 3120 \text{ h/a}\}}$$

$$n_{CFO_{min}} = \frac{6,759 \text{ kW} \cdot 16 \text{ a} \cdot 10 \text{ \%}}{(17,88 \text{ kW} - 6,759 \text{ kW})}$$

$$n_{CFO_{min}} = 1 \text{ a}$$

Wenn die Angaben des Herstellers zutreffen, dann ist die Beleuchtungsanlage nach einem Jahr im ökonomischen Vorteil gegenüber der Bestandsanlage. Dieses Ergebnis ist lediglich auf die Treibhausgase bezogen. Andere Faktoren, wie z. B. die Versauerung müssen separat untersucht werden.

Des Weiteren ist eine Analyse über das Physikalische Optimum zu empfehlen:

$$\Delta F_{PhO_{CFO}} = \frac{CF_{Herst_N} + CF_{Distr_N} + CF_{Recyc_N}}{V_{PhO}^B \cdot n_{LCC} \cdot cf}$$

$$\Delta F_{PhO_{CFO}} = \frac{P_N \cdot n_{LCC} \cdot cf \cdot 10\%}{V_{PhO}^B \cdot n_{LCC} \cdot cf}$$

$$\Delta F_{PhO_{CFO}} = \frac{6,759 \text{ kW} \cdot 3120 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 16 \text{ a} \cdot 10 \text{ \%}}{1,237 \text{ kW} \cdot 3120 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 16 \text{ a}}$$

Die Anlage ist auf die Lebenszykluszeit ausgelegt und wird auch auf diese bewertet, somit kürzen sich die Betriebslaufzeiten vollständig heraus:

$$\Delta F_{PhO_{CFO}} = \frac{6,759 \text{ kW} \cdot 10 \text{ \%}}{1,237 \text{ kW}}$$

$$\Delta F_{PhO_{CFO}} = \Delta f_{PhO_{CFO}} = 0,5464$$

Eine ökologische Vorteilhaftigkeit kann erreicht werden, wenn die Neuanlage einen um mindestens 0,5464 Punkte besseren PhO-Differenzleistungsfaktor als die Bestandsanlage aufweist. Im Vergleich zur ökonomischen Bewertung muss eine höhere Effizienz der Neuanlage erreicht werden.

Zu beachten ist, dass die Treibhausgasemissionen der regelmäßigen Erneuerungen der Leuchtstoffröhren noch nicht berücksichtigt wurden. Diese würden zusätzlich das Ergebnis der Analyse verbessern.

VI OBSOLESZENZANALYSEN

A. BEISPIEL OBSOLESZENZANALYSE

Zu den Beschreibungen aus Kapitel 16 wird eine Analyse basierend auf dem Schwerpunkt der Obsoleszenz durchgeführt. Die vier herausgearbeiteten Gründe für eine Obsoleszenz durch Prakash et al. sind in Kapitel 16 beschrieben.

In den kommenden Analysen werden zwei Waschmaschinentypen miteinander verglichen. Hierbei liegt der Fokus nicht in der Entlarvung der Obsoleszenzgründe, vielmehr sollen die ökonomischen und ökologischen Effekte mithilfe des Physikalischen Optimums gezeigt werden. Betrachtet wird eine Betriebslaufzeit von 20 Jahren. Prakash et al. ermittelten ein vorzeitiges Versagen, bei ca. 10 Prozent aller in Betrieb genommenen Waschmaschinen innerhalb der ersten fünf Jahre.⁵⁹ Die Wissenschaftler weisen auf diesen Effekt quer durch alle Preissegmente hin. In den kommenden Analysen wird eine preiswertere Waschmaschine als der Marktdurchschnitt mit einer deutlich teureren Waschmaschine verglichen. Dabei wird dem Hersteller der hochpreisigen Waschmaschine Glauben geschenkt, dass seine Produkte für eine Laufzeit von zwanzig Jahren ausgelegt und getestet werden.⁶⁰ Weitergehend wird auf den Bericht „EcoTopTen-Kriterien für Waschmaschinen“ des Öko-Institut e.V. hingewiesen. Hier werden ökologische Spitzenprodukte auf ihre Lebenszykluskosten und ihren Carbon Footprint hin untersucht. Das Öko-Institut e.V. ist eines der europaweit führenden Forschungs- und Beratungseinrichtungen.⁶¹ Finanziert wird das Institut unter anderem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Das Öko-Institut e.V. geht bei der Analyse der Waschmaschinen von einer durchschnittlichen Lebenszeit von 12 Jahren aus. Sollten Hersteller eine verlängerte Lebenszeit unter festgelegten Bedingungen belegen, dann wird diese ebenfalls berücksichtigt. Durchschnittlich legt das Öko-Institut eine CO₂-äquivalente Emissionsbelastung von 314 kg für die Herstellung einer Waschmaschine fest. Die kommenden Berechnungen weichen geringfügig von dieser Annahme ab. Eine lineare Verteilung über den gegebenen Mittelwert wird über die tatsächliche Masse des jeweiligen Gerätes gelegt. Durch diesen Schritt haben Produkte mit einem höheren Materialaufwand auch einen höheren Emissionsausstoß in der Produktion. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass dies eine Annahme ist und nicht in jedem Sektor ihre Berechtigung findet. Zwar kann meistens ein Zusammenhang von Material- und Emissionsaufwand hergestellt werden, jedoch stellen unterschiedliche Materialien und Produktionsaufwände nicht zu vernachlässigende Kriterien dar. In diesem Fall und unter der Prämisse, dass hier die Berechnung an sich und nicht das Ergebnis im Zentrum der Betrachtung steht, ist diese Annahme vertretbar. Für die CO₂-äquivalenten Emissionen, resultierend aus dem elektrischen Energiebedarf während des Betriebes, rechnet das Öko-Institut mit einem Wert von 0,637 kg/kWh.

⁵⁹ Vgl. Prakash, S., et al. (2016), S. 25

⁶⁰ Vgl. Gensch, C.-O., Blepp, M. (2015), S. 26

⁶¹ Vgl. Öko-Institut e.V. (2016), S. 3

Die Investitionskosten entnimmt das Öko-Institut e.V. als gemittelte Durchschnittswerte von der Internetplattform Idealo.⁶² Der spezifische Strompreis kommt von der Strompreisanalyse des BDEW (Stand 01/2016), ebenso die spezifischen Kosten für die Wasserversorgung und die Abwasserverwertung. Recyclingkosten werden dem Verbraucher aufgrund des Rückgaberechtes für Altgeräte nicht angelastet. Detaillierte Tabellen mit allen einbezogenen Kennwerten befindet sich im Anhang Kapitel VI Abschnitt e, ebenso die tabellarischen Ergebnisse der Berechnungen.

Abgekürzt wird das kurzlebige Produkt mit dem Index *KLP* und das langlebige Produkt erhält die Abkürzung *LLP* in den kommenden Berechnungen.

$$\Delta f_{PhO} = \frac{\dot{V}_{el,sys1}^B - \dot{V}_{el,sys2}^B}{\dot{V}_{PhO}^B}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = \frac{\dot{V}_{KLP,el}^B - \dot{V}_{LLP,el}^B}{\dot{V}_{PhO,el}^B}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = \frac{21,92 \text{ W} - 15,64 \text{ W}}{10,16 \text{ W}}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = 0,618$$

Die bilanzierten Waschmaschinen weisen einen PhO-Differenzleistungsfaktor von 0,618 beim elektrischen Energiebedarf auf.

B. ÖKONOMISCHER VERGLEICH

Aus dem Vergleich der kurz- und langlebigen Waschmaschinen wird in der ersten Analyse die minimale PhO-Differenzleistungsfaktor ermittelt, um einen ökonomischen Mehraufwand in ein langlebigeres Produkt zu rechtfertigen:

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} = \frac{\Delta CoC_{Obs} + (A_{O_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{LLP}}\right) - (A_{O_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{KLP}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}}$$

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} = \frac{0 + 1249 \text{ €} \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{20 \text{ a}}\right) - 326 \text{ €} \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{5 \text{ a}}\right)}{20 \text{ a} \cdot 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 10,16 \text{ W} \cdot \frac{0,287 \text{ €} \cdot \text{kWh}}{\text{kWh} \cdot 1000 \text{ Wh}}}$$

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} = -0,108$$

Daraus folgt:

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} < \Delta f_{PhO_{KLP-LLP}}$$

$$-0,108 < 0,618$$

Die langlebige Waschmaschine hat ökonomisch deutliche Vorteile gegenüber der kurzlebigen Waschmaschine. Die kumulierten Lebenszykluskosten sind in Abbildung 19-17 dargestellt.

⁶² Vgl. Öko-Institut e.V. (2016), S. 5

Die visuelle Auswertung hat für die Analyse nur eine untergeordnete Bedeutung, da die Vorteilhaftigkeit bereits durch die Gleichung belegt wurde. Eine Berechnung der Kosteneinsparung kann über die Differenz der PhO-Faktoren nach Gleichung (19-21) durchgeführt werden.

$$\Delta CoC_{Obs} = (\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} - \Delta f_{PhO_{KLP-LLP \min}}) \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B \cdot n \cdot k_{el} \quad (19-21)$$

$$\Delta CoC_{Obs} = (0,618 - (-0,108)) \cdot 10,16 \text{ W} \cdot 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} \cdot \frac{0,287 \text{ €} \cdot \text{kWh}}{\text{kWh} \cdot 1000 \text{ Wh}}$$

$$\Delta CoC_{Obs} = 359,26 \text{ €}$$

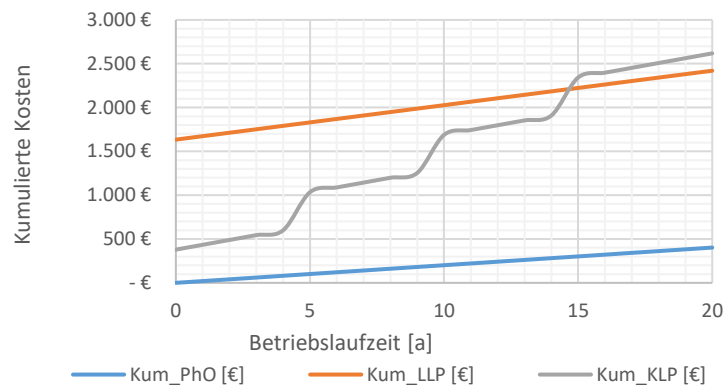


Abbildung 19-17: LCC-Analyse kurzlebige und langlebige Produkte

In der zweiten Analyse wird eine Effizienzsteigerung der kurzlebigen Waschmaschinen, zum Zeitpunkt der Reinvestition, mit jeweils fünf Prozent berücksichtigt. Diese Steigerung sorgt für eine ökonomische Verbesserung der preiswerten Lösung. Alle anderen Werte bleiben konstant.

Nach Gleichung (16-4) aus Abschnitt VI a bleibt die Gleichung zur Differenzbestimmung des notwendigen PhO-Faktors bestehen.

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} = -0,108$$

Für die Berechnung muss der Mittelwert des Physikalischen Faktors bestimmt werden. Dieser kann mit der folgenden Gleichung analysiert werden:

$$V_{KLP \text{ eff}}^B = \sum_{t=1}^{Rt} \dot{V}_{KLP t=0} \cdot t_{KLP} \cdot [1 - \Delta eff_{Rt} \cdot (n - 1)]$$

$$F_{KLP} = \frac{V_{KLP \text{ eff}}^B}{V_{PhO}^B}$$

$$V_{KLP \text{ eff}}^B = \sum_{n=1}^4 [21,92 \text{ W} \cdot 5 \text{ a} \cdot 8760 \text{ h/a} \cdot \{1 - 5 \% \cdot (n - 1)\}]$$

$$F_{KLP} = \frac{3552,35 \text{ kWh}}{1780,03 \text{ kWh}}$$

$$F_{KLP} = 1,996$$

$$F_{LLP} = \frac{2740,13 \text{ kWh}}{1780,03 \text{ kWh}}$$

$$F_{LLP} = 1,539$$

$$\Delta F_{PhO_{KLP\text{ eff}-LLP}} = 0,457$$

Daraus folgt:

$$\Delta f_{PhO_{Obs}} < \Delta F_{PhO_{KLP\text{ eff}-LLP}}$$

$$-0,108 < 0,457$$

Auch hier kann der ökonomische Vorteil nachgewiesen werden. Der monetäre Vorteil berechnet sich analog zur Gleichung (19-21). In Abbildung 19-18 ist die Differenz der LCC zum Bewertungsende deutlich kleiner geworden.

$$\Delta CoC_{Obs} = 226,15 \text{ €}$$

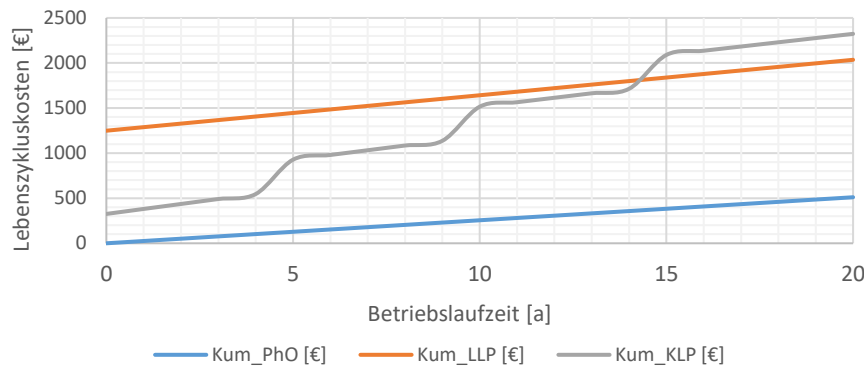


Abbildung 19-18: LCC mit Effizienzsteigerung vom KLP

C. ÖKOLOGISCHER VERGLEICH

Die Treibhausgasemissionen werden ebenfalls über die Lebenszeit der Waschmaschinen bilanziert. Die Emissionen aus der Herstellung werden nach dem Bericht „EcoTopTen-Kriterien Waschmaschinen“ festgelegt. Erweitert wird diese Annahme mit den Erkenntnissen von Gensch et al., dass die Materialgewinnung einen signifikanten Anteil an den Treibhausgasemissionen der Herstellung hat.⁶³ Somit muss angenommen werden, dass eine schwerere Maschine mehr Material aufgenommen hat als das leichtere Produkt. Aus diesem Grund erfolgt eine lineare Verteilung über das Systemgewicht.

Für die Berechnung des mindestens erforderlichen Differenzwertes für das PhO wird die Gleichung (16-9) eingesetzt.

$$\Delta f_{PhO_{ObsCF}} = \frac{558,9 \text{ kg CO}_2 \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{20 \text{ a}}\right) - 440,03 \text{ kg CO}_2 \cdot \left(\frac{5 \text{ a}}{20 \text{ a}}\right)}{\frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} \cdot 10,16 \text{ W} \cdot 0,535 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ Wh}}}$$

⁶³ Vgl. Gensch, C.-O., Blepp, M. (2015), S. 49

$$\Delta f_{PhO_{obs CF}} = -1,26$$

Das Ergebnis besagt, dass der Wirkungsgrad des langlebigen Produktes deutlich schlechter sein kann als der des kurzlebigen Produktes. Bereits in der ersten Zyklusphase des preiswerteren Produktes schafft es das langlebige Produkt seinen erhöhten Schadstoffausstoß in der Produktion zu kompensieren (siehe Abbildung 19-19).

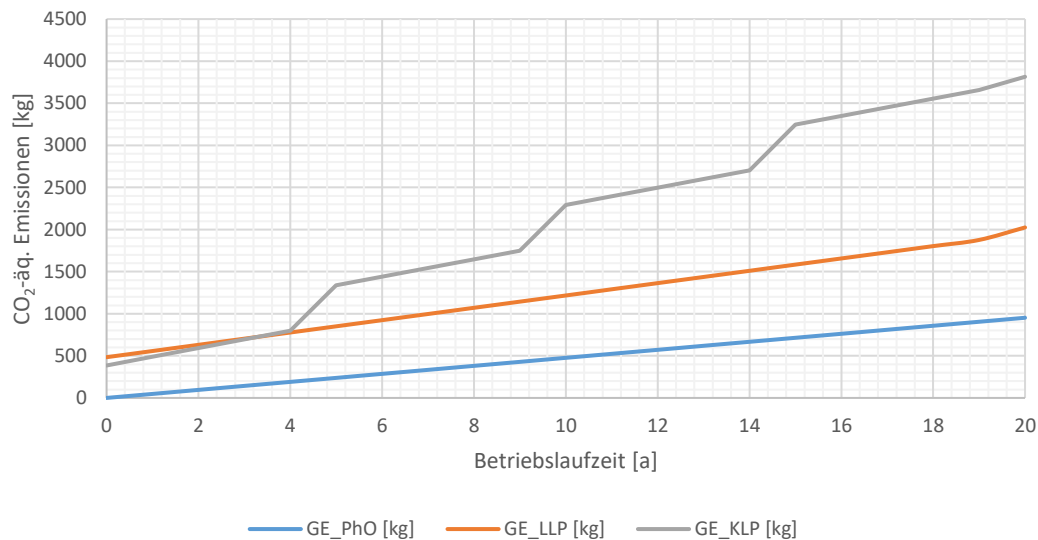


Abbildung 19-19: Treibhausgasemissionen vom KLP und LLP

Die Berechnungen inklusive einer Effizienzsteigerung zwischen den Reinvestitionen verlaufen analog zu den Berechnungen aus Kapitel VI Abschnitt b. Der Verbrauch des KLP und des LLP sind wieder auf die Mittelwerte über die Betriebslaufzeit zu bilanzieren.

$$\Delta f_{PhO_{obs CF}} < \Delta F_{PhO_{KLP-LLP}}$$

$$-1,26 < 0,618$$

Die langlebige Waschmaschine könnte deutlich ineffizienter sein und würde ökologisch, bezogen auf die Treibhausgasemissionen, trotzdem einen deutlichen Vorteil aufweisen.

D. ÖKONOMISCHER VERGLEICH MIT ZWEI VARIABLEN

Eine Analyse mit zwei Variablen, die Einflüsse auf die ökonomische Bewertung haben, wird mithilfe der Gleichungen aus Kapitel 16 durchgeführt. Betrachtet werden wieder die Waschmaschinen aus der vorherigen Analyse. Zusätzlich wird jetzt der Wasserverbrauch über das Physikalische Optimum bewertet und monetisiert in die Vergleichsrechnung der Vorteilhaftigkeit eingebunden. Gleichung (16-6) bildet die Grundlage der Bilanzierung. Aktuell befinden sich in der aufgestellten Gleichung zwei unbekannte Variablen. Eine der beiden Unbekannten wird im ersten Schritt festgelegt und anschließend wird nach der anderen Unbekannten die Gleichung aufgelöst. Ist das Ergebnis definiert, kann das Verfahren mit gespiegelter Anwendung den zweiten Grenzpunkt zeigen.

Erste Berechnung:

$$\Delta f_{PhO_{el1,KLP-LLP}} = 0,456$$

Gleichung umstellen und auflösen:

$$\Delta f_{PhO_{Obs,w1}} = \frac{\Delta CoC_{Obs} + (A_{OLLP} + K_{Recyc_{LLP}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{LLP}}\right) - (A_{OKLP} + K_{Recyc_{KLP}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{KLP}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w} - \frac{\dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}}{\dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w} \cdot \Delta f_{PhO_{Obs,el1}}$$

$$\Delta f_{PhO_{Obs,w1}} = \frac{0 + 1249 \text{ €} \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{20 \text{ a}}\right) - 326 \text{ €} \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{5 \text{ a}}\right)}{8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 20 \text{ a} \cdot 0,001119 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 3,98 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}} - \frac{10,16 \text{ W} \cdot \frac{0,287 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot \frac{\text{kWh}}{1000 \text{ Wh}}}{0,001119 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 3,98 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}} \cdot 0,456$$

$$\Delta f_{PhO_{w1,KLP-LLP}} = -0,369$$

Anschließend werden die zweiten Randbedingungen aufgelöst:

$$\Delta f_{PhO_{Obs,w2}} = 0,0947$$

$$\Delta f_{PhO_{Obs,el2}} = \frac{\Delta CoC_{Obs} + (A_{LLP} + K_{Recyc_{LLP}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{LLP}}\right) - (A_{OKLP} + K_{Recyc_{KLP}}) \cdot \left(\frac{n}{t_{KLP}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}} - \frac{\dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w}{\dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}} \cdot \Delta f_{PhO_{Obs,w2}}$$

$$\Delta f_{PhO_{Obs,el2}} = -0,21513$$

Die aktuellen Differenzen der beiden physikalischen Faktoren, für den Wasser- und Stromverbrauch, werden in Symbiose miteinander bewertet. Dabei haben beide Parameter einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

Die folgende Abbildung 19-20 soll den Zusammenhang verdeutlichen. Dabei bildet die Ordinate die Differenz des PhO-Faktors der elektrischen Effizienz zwischen dem kurzlebigen und dem langlebigen Produkt. Die Abszisse hingegen stellt die Differenz im Wasserverbrauch dar. Die ermittelten Grenzwerte der Wirtschaftlichkeit, in Abhängigkeit der physikalischen Differenzfaktoren, sind als lineare Grenzlinie in blau aufgetragen. Sollte die aktuelle Anlagendifferenzmenge zwischen der langlebigen und der kurzlebigen Waschmaschine unterhalb dieser Geraden rutschen, dann ist keine ökonomische Vorteilhaftigkeit mehr gegeben.

Der aktuelle Stand der Vorteilhaftigkeit zwischen der langlebigen und der kurzlebigen Waschmaschine ist durch die grüne Markierung symbolisiert.

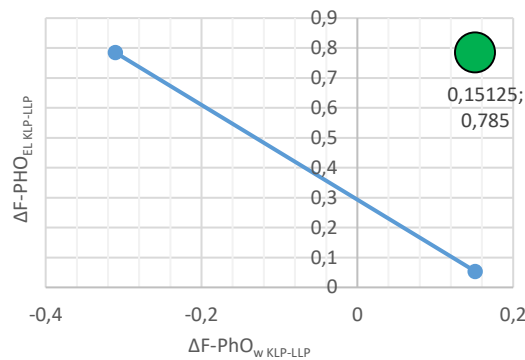


Abbildung 19-20: Grenzwerte Optima KLP-LLP

Daraus folgt, dass selbst wenn die Effizienz im Wasserverbrauch der langlebigen Waschmaschine schlechter wäre als der aktuelle Stand, aber nicht unterhalb der Grenzlinie rutscht, eine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit weiterhin gegeben ist.

E. ÖKONOMISCHES ERGEBNIS

Die Berechnungen aus Kapitel VI Abschnitt a gründen auf den Informationen von der Internetplattform EcoTopTen, Infotabelle „Energieeffiziente Waschmaschinen im Vergleich“ Stand Feb. 2017⁶⁴, dem Datenblatt von Beko WML 81433 MEU⁶⁵ und der Gebrauchsanweisung von Miele WMF 121 WPS PWASH.⁶⁶ Das Physikalische Optimum wurde nach Keichel als Grenzwert der maximalen Effizienz einer Referenzanlage festgelegt. Grundlage stellt das effizienteste Gerät nach EcoTopTen (Stand Februar 2017), der Bosch WASHVOLLautomat WAW285ECO⁶⁷ dar. Die Werte werden als Benchmark-Werte in Tabelle 19-21 deklariert. Die Angaben dienen lediglich zur Verfahrensdarstellung und die angenommenen Daten, sowie die Ergebnisse sind ohne Gewähr. Alle Berechnungsvariablen befinden sich in den folgenden Tabellen.

Tabelle 19-19: Grunddaten Obsoleszenzanalyse

Grunddaten			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
Analysezeit komplett	n	20	Jahre
Energiekosten	k_{el}	0,287	€/kWh
Wasserkosten	k_w	3,98	€/m ³

⁶⁴ Vgl. EcoTopTen (2017)

⁶⁵ Vgl. Beko

⁶⁶ Vgl. Miele

⁶⁷ Vgl. Bosch, S. 1

Tabelle 19-20: Daten LLP-Obsoleszenz

Langlebiges Produkt (LLP) Miele WMF 121 WPS PWASH 8kg A+++			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
Investitionskosten	IK_{LLP}	1249	€
Lebensdauer	t_{LLP}	20	Jahre
Leistung	$\dot{V}_{LLP,el}$	15,64	W
Materialeinsatz	m_{LLP}	96	kg
Wasserverbrauch	$V_{LLP,w}$	9,8	m ³ /a
Wasserverbrauch per Stunde	$V_{LLP,w}$	0,00111872	m ³ /h
Wasserkosten im Jahr	$K_{LLP,w}$	39,004	€/a
Schleuderdrehzahl	n_{LLP}	1600	u/min

Tabelle 19-21: Daten PhO-Obsoleszenz

Physikalisches Optimum PhO (Basisdaten Bosch WAW285ECO)			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
Leistung elektrisch	$\dot{V}_{PhO,el}$	10,16	W
Verbrauch Wasser	$V_{PhO,w}$	9,8	m ³ /a
Wasserverbrauch per Stunde	$\dot{v}_{PhO,w}$	0,00111872	m ³ /h

Tabelle 19-22: Daten KLP-Obsoleszenz

Kurzlebiges Produkt (KLP) Beko WML81433 8 kg A+++			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
Investitionskosten	IK_{KLP}	326	€
Lebensdauer	t_{KLP}	5	Jahre
Leistung	$\dot{V}_{KLP,el}$	21,92	W
Effizienzsteigerung elektrisch per Revision	$\Delta eff_{RT,el}$	5%	%
Materialeinsatz	m_{KLP}	70	kg
Wasserverbrauch	$V_{KLP,w}$	11,06	m ³ /a
Wasserverbrauch per Stunde	$\dot{v}_{KLP,w}$	0,00126256	m ³ /h
Wasserkosten im Jahr	$K_{KLP,w}$	44,0188	€/a
Effizienzsteigerung Wasserverbrauch per Revision	$\Delta eff_{RT,w}$	2%	%
Schleuderdrehzahl	n_{LLP}	1400	u/min

Eingebunden in die Berechnungen ist eine Effizienzsteigerung des kurzlebigen Produktes zum jeweiligen Zeitpunkt der Revision. Der elektrische Verbrauch kann jeweils um fünf Prozentpunkte und der Wasserbedarf um zwei Prozentpunkte verbessert werden. Somit handelt es sich um eine Analyse über zwei unbekannte Verbrauchsvariablen. Die Berechnung der Mittelverbrauchswerte erfolgt nach Gleichung (16-5). Beispielhaft ist der gemittelte elektrische Energiebedarf in der kommenden Gleichung berechnet.

$$j_{KLP} = \frac{n}{t_{KLP}} = \frac{20 \text{ a}}{5 \text{ a}} = 4$$

$$V_{KLP,el,t=0-20}^B = \sum_{X=1}^{j_{KLP}} \dot{V}_{KLP,t=0}^B \cdot t_{KLP} \cdot [1 - \Delta eff_{RT,el} \cdot (X - 1)]$$

$$V_{KLP,el,t=0-20}^B = \sum_{x=1}^4 21,92 \text{ W} \cdot 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 5 \text{ a} \cdot [1 - 5 \% \cdot (t - 1)]$$

$$V_{KLP,el,t=0-20}^B = 3552,35 \text{ kWh}$$

$$\dot{V}_{KLP,el,t=0-20}^B = 20,276 \text{ W}$$

Die resultierenden PhO-Faktoren der beiden Vergleichsobjekte und die Differenzfaktoren sind in Tabelle 19-23 aufgelistet. Die relevanten Daten für die Wechselwirkung auf der elektrischen Seite sind durch eine rote Schrift hervorgehoben. Die Parameter des Wasserverbrauchs wurden durch eine blaue Schrift gekennzeichnet.

Die Tabellen 19-24 und 19-25 beinhalten die Ergebnisse der Berechnungen. Sie geben die Grenze für eine ökonomische Vorteilhaftigkeit (vgl. Kapitel 16). Es wurde der bestehende Parameter der ersten Variable (elektrischer Differenzfaktor) festgesetzt zu einer Konstanten und anschließend nach der übrigen „freien“ Variable (Wasserbedarf) aufgelöst (Tabelle 19-24). In dem Berechnungsergebnis Tabelle 19-25 tauschten die Konstante und die Variable ihre Eigenschaften.

Tabelle 19-23: Anlagenbewertung KLP-LLP

Anlagenbewertungen			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
PhO-Faktor LLP elektrisch, t = 0	$F_{PhO_{el},LLP,t=0}$	1,539	
PhO-Faktor KLP elektrisch, t = 0	$F_{PhO_{el},KLP,t=0}$	2,157	
PhO Differenzfaktor elektrisch, t = 0	$\Delta F_{PhO_{el},KLP-LLP,t=0}$	0,618	
Leistungsunterschied Start, elektrisch	$\Delta \dot{V}_{PhO_{el},KLP-LLP,t=0}$	6,280	W
PhO-Faktor KLP gemittelt, elektrisch, t = 0-20	$F_{PhO_{el},KLP,t=0-20}$	1,996	
PhO Differenzfaktor gemittelt, elektrisch, t = 0-20	$\Delta F_{PhO_{el},KLP-LLP,t=0-20}$	0,456	
Leistungsunterschied gemittelt, elektrisch	$\Delta \dot{V}_{PhO_{el},KLP-LLP,t=0-20}$	4,636	W
Gemittelter Leistungsbedarf KLP, elektrisch	$\dot{V}_{KLP,el,t=0-20}$	20,276	W
PhO-Faktor LLP, Wasser, t = 0	$F_{PhO_w,LLP,t=0}$	1,000	
PhO-Faktor KLP gemittelt, Wasser, t = 0-20	$F_{PhO_w,KLP,t=0-20}$	1,094	
PhO Differenzfaktor gemittelt, Wasser, t = 0-20	$\Delta F_{PhO_w,KLP-LLP,t=0-20}$	0,095	
Gemittelter Wasserbedarf KLP	$V_{KLP,w,t=0-20}$	10,728	m ³ /a

Tabelle 19-24: Ergebnis Differenzfaktor Wasserverbrauch

Festsetzen vom $\Delta F_{PhO\ el}$ und Auflösen nach dem $\Delta F_{PhO\ w}$			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
PhO Differenzfaktor gemittelt elektrisch, $t = 0-20$	$\Delta F_{PhO\ el, KLP-LLP, t=0-20}$	0,456	
Notwendiger PhO Differenzfaktor gemittelt Wasser, $t = 0-20$	$\Delta F_{PhO\ w\ min, KLP-LLP, t=0-20}$	-0,369	

Tabelle 19-25: Ergebnis Differenzfaktor elektrischer Energiebedarf

Festsetzen von dem $\Delta F_{PhO\ w}$ und Auflösen nach dem $\Delta F_{PhO\ el}$			
Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
PhO Differenzfaktor gemittelt Wasser, $t = 0-20$	$\Delta F_{PhO\ w, KLP-LLP, t=0-20}$	0,095	
Notwendiger PhO Differenzfaktor gemittelt elektrisch, $t = 0-20$	$\Delta F_{PhO\ el\ min, KLP-LLP\ t=0-20}$	-0,215	

Die Grenze der betriebswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit ist in Abbildung 2-1 eingetragen. Sie beschreibt die Wechselwirkung zwischen den betrachteten Verbrauchsvariablen. Deutlich ist zu erkennen, dass einer der beiden Verbrauchskennwerte negativ werden kann, ohne dass ein wirtschaftlicher Nachteil entsteht. Eine ausführliche Herleitung der Gleichung befindet sich in Abschnitt VI g.

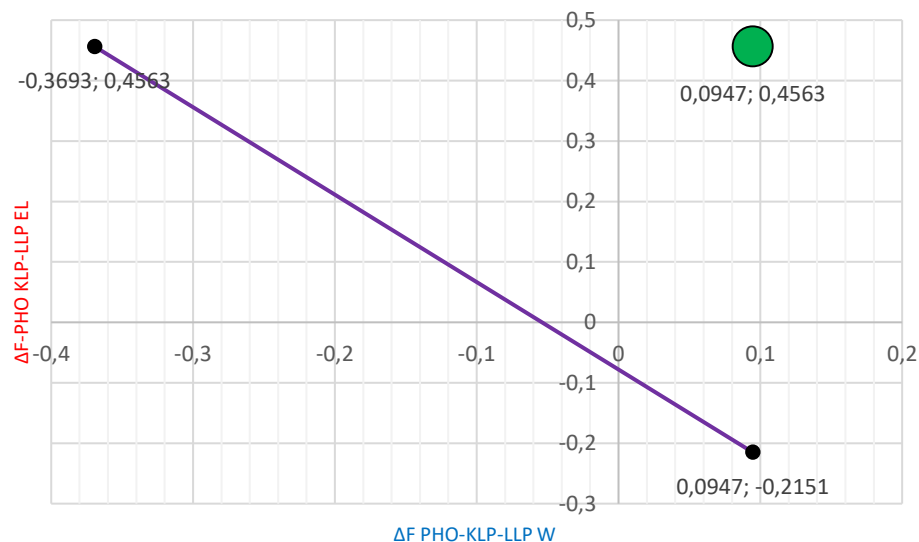


Abbildung 19-21: Grenzwerte zwischen zwei Optima

F. HERLEITUNG OBSOLESZENZ EINE VARIABLE

Zur Bewertung der Wechselwirkung zwischen dem PhO und dem BwO, begrenzt auf die vorhandenen Konfigurationen, wurden die Gleichungen in Kapitel 16 vorgestellt. Diese sollen im aktuellen Abschnitt für eine bessere Nachvollziehbarkeit hergeleitet werden. Grundlage bildet der physikalische Differenzfaktor aus Gleichung (7-11).

$$\Delta F_{PhO_{KLP-LLP}} = F_{PhO_{KLP}} - F_{PhO_{LLP}}$$

$$\Delta F_{PhO_{KLP-LLP}} = \frac{V_{KLP}^B - V_{LLP}^B}{V_{PhO}^B}$$

Die Operationskosten werden auf den Verbrauch reduziert. Dieser stellt in der Regel den größten Kostenfaktor dar.

$$CoC_{Obs} = [A_o + K_{Recyc}] \cdot j + \dot{V} \cdot k_{el} \cdot n$$

$$CoC_{Obs_{KLP}} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot j + \dot{V}_{KLP}^B \cdot k_{el} \cdot n$$

$$CoC_{Obs_{LLP}} = [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot j + \dot{V}_{LLP}^B \cdot k_{el} \cdot n$$

Die Variable j beschreibt die Häufigkeit der Reinvestitionen:

$$j = \frac{n}{t_R}$$

Die Differenzsumme zweier Systeme beschreibt den monetären Vor- bzw. Nachteil der Systeme untereinander:

$$\Delta CoC_{Obs} = CoC_{Obs_{KLP}} - CoC_{Obs_{LLP}}$$

Anschließend werden die Gleichungen zusammengeführt und nach dem PhO-Differenzleistungsfaktor aufgelöst:

$$\Delta CoC_{Obs} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}} + \dot{V}_{KLP}^B \cdot k_{el} \cdot n - \left\{ [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} + \dot{V}_{LLP}^B \cdot k_{el} \cdot n \right\}$$

$$\Delta CoC_{Obs} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}} - [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} + (\dot{V}_{KLP}^B - \dot{V}_{LLP}^B) \cdot k_{el} \cdot n$$

$$\dot{V}_{KLP}^B - \dot{V}_{LLP}^B = \frac{\Delta CoC_{Obs} + [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} - [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}}}{n \cdot k_{el}}$$

$$\dot{V}_{KLP}^B - \dot{V}_{LLP}^B = \Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO}^B$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO}^B = \frac{\Delta CoC_{Obs} + [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} - [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}}}{n \cdot k_{el}}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = \frac{\Delta CoC_{Obs} + [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} - [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}}}{n \cdot k_{el} \cdot \dot{V}_{PhO}^B}$$

G. HERLEITUNG OBSOLESZENZ ZWEI VARIABLEN

Der Lösungsweg für die Gleichung mit zwei Unbekannten ist vom Verlauf identisch mit der Lösung für eine Variable aufgebaut. Hier werden nun jedoch zwei Differenzfaktoren eingebunden, was auch zu zwei Lösungsmöglichkeiten führt. Dafür wird eine Variable festgesetzt und nach der anderen Variable aufgelöst.

$$\Delta F_{PhO_{KLP-LLP},el} = \frac{V_{KLP,el}^B - V_{LLP,el}^B}{V_{PhO,el}^B}$$

$$\Delta F_{PhO_{KLP-LLP},w} = \frac{V_{KLP,w}^B - V_{LLP,w}^B}{V_{PhO,w}^B}$$

$$CoC_{Obs_{KLP}} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}} + \dot{V}_{KLP,el}^B \cdot k_{el} \cdot n + \dot{V}_{KLP,w}^B \cdot k_w \cdot n$$

$$CoC_{Obs_{LLP}} = [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} + \dot{V}_{LLP,el}^B \cdot k_{el} \cdot n + \dot{V}_{LLP,w}^B \cdot k_w \cdot n$$

$$\Delta CoC_{Obs} = CoC_{Obs_{KLP}} - CoC_{Obs_{LLP}}$$

$$\Delta CoC_{Obs} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}} + \dot{V}_{KLP,el}^B \cdot k_{el} \cdot n + \dot{V}_{KLP,w}^B \cdot k_w \cdot n$$

$$- \left\{ [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} + \dot{V}_{LLP,el}^B \cdot k_{el} \cdot n + \dot{V}_{LLP,w}^B \cdot k_w \cdot n \right\}$$

$$\Delta CoC_{Obs} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}} - [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} + (\dot{V}_{KLP,el}^B - \dot{V}_{LLP,el}^B) \cdot k_{el} \cdot n$$

$$+ (\dot{V}_{KLP,w}^B - \dot{V}_{LLP,w}^B) \cdot k_w \cdot n$$

$$\dot{V}_{KLP,el}^B - \dot{V}_{LLP,el}^B = \Delta f_{PhO_{el,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B$$

$$\dot{V}_{KLP,w}^B - \dot{V}_{LLP,w}^B = \Delta f_{PhO_{w,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,w}^B$$

$$\Delta CoC_{Obs} = [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}} - [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} + (\Delta f_{PhO_{el,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B) \cdot k_{el} \cdot n$$

$$+ (\Delta f_{PhO_{w,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,w}^B) \cdot k_w \cdot n$$

$$\Delta f_{PhO_{el,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el} \cdot n + \Delta f_{PhO_{w,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w \cdot n$$

$$= \Delta CoC_{Obs} + [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} - [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}}$$

Lösung 1)

$$\Delta f_{PhO_{el,KLP-LLP}} + \frac{\Delta f_{PhO_{w,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w}{\dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}}$$

$$= \frac{\Delta CoC_{Obs} + [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} - [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}}}{\dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el} \cdot n}$$

Lösung 2)

$$\Delta f_{PhO_{w,KLP-LLP}} + \frac{\Delta f_{PhO_{el,KLP-LLP}} \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B \cdot k_{el}}{\dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w}$$

$$= \frac{\Delta CoC_{Obs} + [A_{o_{LLP}} + K_{Recyc_{LLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RLLP}} - [A_{o_{KLP}} + K_{Recyc_{KLP}}] \cdot \frac{n}{t_{RKLP}}}{\dot{V}_{PhO,w}^B \cdot k_w \cdot n}$$

H. ÖKOLOGISCHES ERGEBNIS

Die ökologische Bewertung der Obsoleszenz erfolgt über die Treibhausgasemissionen der unterschiedlichen Produkte. Die benannten Emissionen für die Herstellung stammen aus dem Bericht „EcoTopTen-Kriterien Waschmaschinen“⁶⁸ und werden mit 314 kg CO₂-äq. angegeben. Zusätzlich werden die Emissionen während der Herstellung linear über die unterschiedlichen Gewichte der Waschmaschinen verteilt. Somit bekommt eine schwerere Waschmaschine mit einem höheren Materialeinsatz auch höhere Emissionsaufwendungen zur Last gelegt. Die Emissionsbelastungen für den elektrischen Energieverbrauch werden mit 0,535 kg CO₂-äq. /kWh angesetzt (vgl. Abbildung 9-1). Zusätzlich werden Emissionsaufwendungen für die Distribution und das Recycling eingerechnet, basierend auf Annahmen. Der physikalische Optimalverbrauch resultiert aus den Beschreibungen des Abschnitts VI a.

Tabelle 19-26: Grunddaten CO₂-Emissionen

Beschreibung	Index	Wert	Einheit
Analysezeit komplett	t	20	Jahre
CO ₂ -Emissionen Strom	$CO_{2,el}$	0,535	kg CO ₂ -äq/kWh
CO ₂ -Emissionen Waschmaschine ⁶⁹	$CO_{2,Herst}$	314	kg CO ₂ -äq/kWh

Tabelle 19-27: Emissionsgrundlagen LLP

Langlebiges Produkt (LLP) Miele WMF 121 WPS PWASH 8 kg A+++			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
CO ₂ -Produktionsaufwendungen	$CO_{2,Herst\ LLP}$	363,90	kg CO ₂ -äq/kWh
CO ₂ -Distribution	$CO_{2,Distr\ LLP}$	120	kg CO ₂ -äq/kWh
Entsorgungsemissionen	$CO_{2,Recyc\ LLP}$	75	kg CO ₂ -äq/kWh
Lebensdauer	t_{LLP}	20	Jahre
Verbrauch	$\dot{V}_{LLP,el}$	15,64	W
Materialeinsatz	m_{LLP}	96	kg

Tabelle 19-28: Emissionsgrundlage KLP

Kurzlebiges Produkt (KLP) WML81433 8 kg A+++			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
CO ₂ -Produktionsaufwendungen	$CO_{2,Herst\ KLP}$	265,34	kg CO ₂ -äq/kWh
CO ₂ -Distribution	$CO_{2,Distr\ KLP}$	120	kg CO ₂ -äq/kWh
Entsorgungsemissionen	$CO_{2,Recyc\ KLP}$	54,69	kg CO ₂ -äq/kWh
Lebensdauer	t_{KLP}	5	Jahre
Verbrauch	$\dot{V}_{KLP,el}$	21,92	W
Materialeinsatz	m_{KLP}	70	kg

⁶⁸ Vgl. Öko-Institut e.V. (2016), S. 5

⁶⁹ ebd.

Beispielhaft wird die notwendige PhO-Faktordifferenz für den Betrieb der Waschautomaten berechnet. Dieser bezieht sich auf den elektrischen Energiebedarf der Geräte. Gleichung (16-9) beschreibt den Zusammenhang.

$$CO_2 \text{ äq}_{fix} = CO_2 \text{ äq}_{Herst} + CO_2 \text{ äq}_{Distr} + CO_2 \text{ äq}_{Recyc}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = \frac{\Delta CF + CO_2 \text{ äq}_{fix_{LLP}} \cdot \left(\frac{n}{t_{LLP}}\right) - [CO_2 \text{ äq}_{fix_{KLP}}] \cdot \left(\frac{n}{t_{KLP}}\right)}{n \cdot \dot{V}_{PhO,el}^B \cdot CO_{2,el}}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = \frac{0 + 558,90 \text{ kg CO}_2 \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{20 \text{ a}}\right) - 440,03 \text{ kg CO}_2 \cdot \left(\frac{20 \text{ a}}{5 \text{ a}}\right)}{20 \text{ a} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot 0,535 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} \cdot 10,16 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}}$$

$$\Delta f_{PhO_{KLP-LLP}} = -1,2614$$

Tabelle 19-29: Ergebnisse Obsoleszenzanalyse

Ergebnis ökologische Obsoleszenzanalyse			
Beschreibung	Index	Wert	Einheit
Notwendiger PhO-Differenzfaktor elektrisch	$\Delta F_{PhO_{el, min, KLP-LLP}}$	-1,261	
Benötigte Leistungsdifferenz	$\Delta \dot{V}_{PhO, el, min, KLP-LLP}$	-12,815	W
Aktueller PhO Unterschied	$\Delta F_{PhO_{el, KLP-LLP}}$	0,618	
Aktuelle Leistungsdifferenz	$\Delta \dot{V}_{PhO_{el, KLP-LLP}}$	6,280	W

Das negative Ergebnis besagt, dass das kurzlebigere Produkt deutlich effizienter sein muss als das langlebigere, um die Emissionsaufwendungen der Revision einzuholen. Das kurzlebigere Produkt müsste 12,815 W unter dem Verbrauch des LLP liegen, somit auch deutlich unter dem aktuell effizientesten Gerät auf dem Markt, welches den aktuellen Grenzwert als Benchmark-Wert darstellt. In Abbildung 19-22 sind die Gesamtaufwendungen grafisch dargestellt.

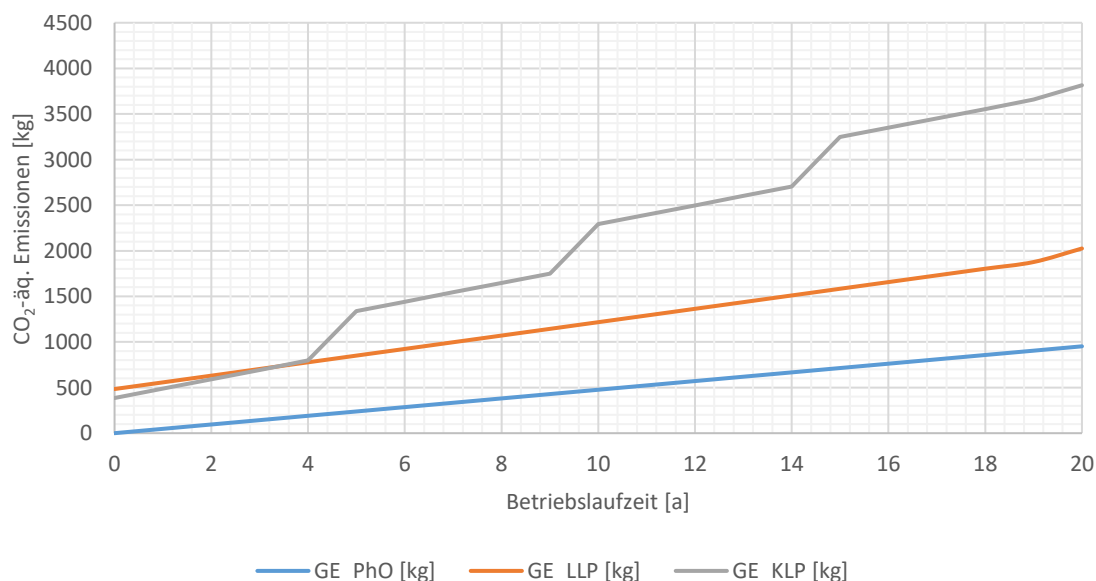


Abbildung 19-22: CF vom KLP, LLP und PhO